



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja Maaehitusinstituut

Henry Maask

**KLAASPLASTSARRUSEGA BETOONTALADE
LÄBIPAINDE UURIMINE**
DEFLECTION OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH
GLASS FIBER POLYMER BARS

Magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: dotsent Alexander Ryabchikov, PhD

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Henry Maask		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Klaasplastsarrusega betoontalade läbipainde uurimine			
Lehekülgi: 61	Jooniseid: 19	Tabeleid: 10	Lisasid: 9
Osakond/Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERCS-i kood:		Tehnikateadused: T220, T230	
Juhendaja(d):		dotsent Alexander Ryabchikov	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Klaasplastsarrus on populaarsust koguv terassarruse asendaja betoonkomposiit-konstruktsioonides. Populaarsuse kasvu peamiseks põhjuseks võib välja tuua klaasplastsarruse kindluse agressiivses keskkonnas. Klaasplastsarrus ei korrodeeru, on mittemagnetiseeruv ja kaalult kerge materjal.</p> <p>Käesoleva magistritöö eesmärgiks on klaasplastsarrusega Armastek armeeritud betoontalade läbipainde uurimine erinevate sarruste läbimõõtude ja kaitsekihtide korral. Lisaks uuritakse, kas sarnase nakkepinna, kuid eri sarrustega katsekehadel on sarnased tulemused. Töö teostamiseks kasutati sarruseid läbimõõtudega 6, 8 ja 10 mm ja betooni kaitsekihi paksuseks võeti 15, 30 ja 40 mm. Kokku valmistati 35 katsekeha AS TMB Element poolt toodetavast betoonist klassiga C35/45. Läbipainde ja paindetõmbetugevuse leidmiseks viidi läbi nelja punkti paindekatsed.</p> <p>Katsetulemused näitasid, et lõpliku paindetõmbetugevuse saavutamisel olid tugevaimad katsekehad sarrustega 4×ø6 kaitsekihiga 15 mm ja 2×ø8 kaitsekihtidega 30 ja 40 mm sarnase keskmise tugevusega, kuid katsekehad sarrustega 2×ø8 15 mm kaitsekihiga olid nõrgemad. Maksimaalse lubatud läbipainde (0,9 mm) puhul saavutasid parima tulemuse sarrused 4×ø6 ja 2×ø10, kaitsekihiga 15 mm.</p>			
Märksõnad: klaasplastsarrus, läbipaine, paindetõmbetugevus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master’s Professional Higer Education Thesis	
Author: Henry Maask		Curriculum: Civil Engineering (Rural Building), 382	
Title: Deflection of concrete beams reinforced with glass fiber polymer bars			
Pages: 61	Figures: 19	Tables: 10	Appendixes: 9
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERCS) code:		Technological Sciences: T220, T230	
Supervisors:		Associate Professor Alexander Ryabchikov	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>Glass fiber reinforced polymer (GFRP) is becoming more popular than steel reinforcement in concrete structures. It is used mainly in structures that are exposed to aggressive environment. GFRP doesn’t corrode, is nonmagnetic and lightweight.</p> <p>The aim of this thesis is to investigate deflection of concrete beams with Armastek GFRP bars. Beams have reinforcing bars with different bar diameters and defensive layers of concrete. In addition, the aim is to examine if bars that have a similar bond area, but a different bar diameter have similar results. Three different diameters for bars were used in the test – 6, 8 and 10 mm, also three different defensive layer thicknesses of 15, 30 and 40 mm were applied. 35 concrete beams were used in the test, which were made of C35/45 concrete at AS TMB Element. Four point bending test was used to investigate deflection and flexural tensile strength.</p> <p>Test results showed that the specimens with bars 4×ø6 and 2×ø8, with 30 and 40 mm defensive layers had the best average flexural tensile strength, but specimens with defensive layer of 15 mm were weaker. Best results for allowable deflection of 0,9 mm were obtained by bars 4×ø6 and 2×ø10, with 15 mm defensive layer.</p>			
Keywords: glass fiber reinforcement polymer bar, deflection, flexural tensile strength			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	8
1.1. Polümeerkiudsarruse ajalugu.....	8
1.2. Polümeerkiudsarruse ehitus	9
1.2.1. Klaaskiud	10
1.2.2. Süsinikkiud	11
1.2.3. Aramiidkiud.....	11
1.3. Polümeerkiudsarruse tootmine	11
1.4. Kiudude sidusaine	12
1.4.1. Termokõvenevad vaigud	13
1.4.2. Termoplastsed vaigud.....	14
1.5. Klaasplastsarrus Armastek	14
1.6. Ülevaade eelnevatest uurimistöödest.....	16
1.7. Näiteid polümeerkiudsarruse kasutamisest	18
1.8. Magistritöö eesmärk	20
2. KLAASPLASTSARRUSEGA ARMEERITUD TALADE PAINDEKATSE	21
2.1. Katse metoodika	21
2.1.1. Katsekehad	21
2.1.2. Katse käik	22
3. KATSETULEMUSED JA ARUTELU	25
3.1. Katsekeha läbipaine.....	25
3.2. Katsekeha purustav koormus ja purunemisviisid	28
3.3. Katsekeha paindetõmbetugevus	34
3.4. Klaasplastsarruse Armastek hinna analüüs.....	36
KOKKUVÕTE	38
KASUTATUD KIRJANDUS	41
LISAD	43
Lisa 1. Klaasplastsarrusega tugevdatud betoonist katsekehad	44
Lisa 2. Katsekehade valmistamine	45
Lisa 3. C35/45 betooni andmed.....	46

Lisa 4. Katsekehade läbipainded vastavalt koormusele	47
Lisa 5. Katseprotokollid	48
Lisa 6. Katsekehade paindediagrammid	55
Lisa 7. Koormused lubatud läbipaindel	59
Lisa 8. Purustav koormus ja paindetõmbetugevus	60
Lisa 9. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	61

SISSEJUHATUS

Nii betoon kui ka raudbetoon komposiitmaterjalina on ehituses pikemat aega laialdaselt kasutuses olnud. Betoonile on omane suur survetugevus ning tõmbepingete vastuvõtmiseks kasutatakse komposiidis terassarrust. Raudbetooni kui komposiitmaterjali on kasutatud pikalt, kuid 20. sajandi teisel poolel hakkasid terassarrusega tekkima korrosiooniprobleemid ning oli vaja välja mõelda komposiitmaterjal, mis oleks mitte-magnetiliste omadustega. Nende probleemide lahendamiseks leiutati polümeerkiudsarrus, mis on kergem materjal ning on omadustelt mittemagnetiseeruv ja korrosioonikindel. Kõige enam levinud materjaliks on klaasplastsarrus oma madala hinna ja lihtsa tootmisprotsessi tõttu.

Terassarrust saab samuti kaitsta korrosiooni eest, kui sellele on tagatud piisav betoonist kaitsekihi paksus ja tugevusklass. Kuid liigne kaitsekiht ei ole otstarbekas, sest see muudab konstruktsioonid raskemaks ning igal pool ei ole võimalik vajaliku paksusega kaitsekihti tagada. Uurimistöös käsitletaval klaasplastsarrusel puudub korrodeerumise oht. Seda materjali saab kasutada agressiivses keskkonnas, näiteks välisseinte konstruktsioonides ja sadamarajatistes. Klaasplastsarruse tõmbetugevus on kuni 2,5 korda suurem terase omast ja tiheduselt on see kuni 3,8 korda kergem. Lisaks sellele on antud sarrust võimalik saada suurtes pikkustes.

Siinse magistritöö eesmärk on klaasplastsarrusega Armastek tugevdatud betoontalade läbipainde uurimine erinevate sarruste läbimõõtude ja erinevate kaitsekihtide korral. Lisaks uuritakse, kas sarnase nakkepinnaga, kuid eri sarrustega katsekehadel on sarnased näitajad. Kuna klaasplastsarruse elastsusmoodul on terase omaga võrreldes ligikaudu neli korda väiksem, siis selgitatakse töös välja, kui suurte koormuste korral saavutavad katsekehad lubatud läbipainde. Töö keskmeks on paindetõmbetugevuse määramine ja katsetulemuste analüüs, et välja selgitada, mis oleks kõige optimaalsem kaitsekiht ja sarrus.

Magistritöö esimeses peatükis antakse ülevaade polümeerkiudsarruse ajaloost, koostisosade komponentidest ja räägitakse lähemalt eri liiki kiududest. Samuti kirjeldatakse tootmisprotsesse ja sidusaineid, räägitakse erinevatest vaikudest ja nende omadustest. Lisaks

tutvutakse lähemalt Armastek klaasplastsarrusega ja võrreldakse selle näitajaid terassarrusega. Peatüki lõpus antakse ka ülevaade klaasplastsarruse erinevatest kasutuskohadest.

Teises peatükis tutvustatakse katsemetoodikat, kirjeldatakse katsekehasid ja katse käiku.

Kolmandas peatükis esitatakse katsetulemused, arutelu ja järeldused.

Autor tänab juhendajat, ehitusmehaanika dotsenti Alexander Ryabchikovi, magistritöö valmimisele kaasaaitamise eest. Samuti tänab autor OÜ Donleoni, kes andis katsemeetodi valmistamiseks vajalikus koguses klaasplastsarrust Armastek, AS TMB Elementi, kes aitas kaasa katsekehade valmistamisel ja AS Rauameistrit, kus valmistati rakis läbipainete mõõtmiseks.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Polümeerkiudsarruse ajalugu

Raudbetoon komposiitkonstruktsioonide peamiseks probleemiks on terassarruse korrosioon. Selle nähtuse põhjuseks on suhteliselt väike betoonist kaitsekiht, mis kiirendab korrodeerumise võimalust ning tulemuseks on konstruktsiooni kandevõime vähenemine [1]. Paljud ehitised, näiteks sillad, garaažid ja sadamarajatised, asuvad agressiivses keskkonnas, kus soolade, niiskuse ja temperatuuri kombinatsiooni tulemusena tekib terase korrosioon [2].

1950. aastail kiirteede kasutamine sagenes ning see nõudis teede aastaringset hooldust. Tavaks sai libedustõrjeks kiirteesildadel soola kasutamine [2]. 1960ndatel hakkas kiirteesildadel ja hoonetel esile kerkima korrosiooniprobleem. Libedustõrje soolad külmas kliimas ja meresool rannikualadel kiirendasid korrosiooni teket terassarrusel [3].

Esmaseks lahenduseks prooviti galvaniseerimist (elektrolüüsi teel metalliga katmine), kuid see kaotas poolehoidu mitmetel põhjustel, millest peamine oli tsingi ja terase reaktsioon, mis tekitas korrosioonikaitse kadu [3]. Mitmete teiste lahenduste seast leiti, et parim lahendus on terassarruse katmine epoksiidvaiguga ning seda hakati kasutama agressiivsetes keskkondades. Lahenduste seas oli ka polümeerkiudsarrusega (*FRP – Fiber reinforced plastic*) armeerimine, kuid seda ei peetud heaks lahenduseks. [2]

Vaatamata varasemalt tehtud uurimisele, mis käsitlesid polümeerkiudsarruse kasutamist betoonis, ei tulnud see kasutusele enne 1970ndate lõppu. Marshall-Vega ja International Grating korporatsioonid hakkasid juhtima polümeerkiudsarruse arendamist ja uurisid polümeerkiudsarruse eeliseid ning puudusi võrreldes seda terassarrusega (tabel 1). [2]

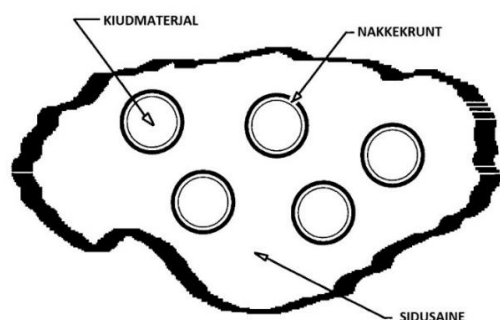
Tabel 1. Polümeerkiudsarruse eelised ja puudused [2]

Polümeerkiudsarruse eelised	Polümeerkiudsarruse puudused
Suur tõmbetugevus	Ei veni enne purunemist
Korrosioonikindel	Madal põiksuunaline tugevus
Mitteragnetiseeruv	Madal elastsusmoodul
Kõrge väsimuspiir	Polümeersed vaigud ja kiud on tundlikud UV-kiirguse suhtes
Kerge (1/5 kuni 1/4 terase tihedusest)	Klaaskiudude madal vastupidavus niiskes keskkonnas
Madal soojus- ja elektrijuhtivus	Madal vastupidavus leeliselises keskkonnas
	Suur joonpaisumise tegur
	Madal tulepüsivus

Tänu sellele, et polümeerkiudsarrus ei roosteta, saab seda kasutada ehitiste rajamisel agressiivsesse keskkonda. Sarruse mitteragnetiline omadus võimaldab seda materjali kasutada ruumide rajamisel, mis on tundlikud elektromagnetväljade suhtes. [2]

1.2. Polümeerkiudsarruse ehitus

Polümeerkiudsarrus on komposiitmaterjal, mis koosneb kahest või enamast materjalist (täitematerjalist või tugevdatud elementidest ja siduvainest), millel on erinevad omadused ja mis on kombineerituna paremate omadustega kui üksiku materjalina [4]. Polümeerkiudsarruse struktuur on esitatud joonisel 1 [3].



Joonis 1. Polümeerkiudsarruse struktuur [3].

Komposiitmaterjali mehaanilised omadused sõltuvad peamiselt kiudude tugevusest, keemilisest stabiilsusest, sidusainest ja nende ühenduste võimalusest kanda edasi jõudusid [5].

Kiudained, mida kasutatakse komposiidi tootmisel, peavad olema kõrge tugevuse, jäikuse, vastupidavuse ja eeldatavalt madala maksumusega. Kiudusid mõjutavad pikkus, ristlõike kuju ja keemiline koostis. Kiud on saadaval erinevate ristlõike suurustega. Kõige sagedamini kasutatakse süsinik-, klaas- ja aramiidkiudusid. [7]

1.2.1. Klaaskiud

Klaaskiud jagunevad vastavalt füüsikalistele omadustele eri klassidesse järgmiselt: A, C, D, E, AR, R, S ja S-2 klass. Tabelis 2 on välja toodud nende klasside füüsikalised ja mehaanilised omadused. [6]

Tabel 2. Erinevate klaaskiudude tehnilised omadused [6]

Klass	Tihedus g/cm ³	Tõmbetugevus GPa	Elastsusmoodul GPa	Venivus %	Omadused
A	2,44	3,310	68,9	4,8	Suur kestvus, tugevus ja elektriline vastupidavus
C	2,52	3,310	68,9	4,8	Suur korrosioonikindlus
D	2,11– 2,14	2,415	51,7	4,6	Madal dielektriline konstant
E	2,58	3,445	72,3	4,8	Kõrge tugevus ja elektriline vastupidavus
AR	2,70	3,241	73,1	4,4	Leelisekindlus
R	2,54	4,135	85,5	4,8	Kõrge tugevus ja happekindlus
S	2,46	4,890	86,9	5,7	Suur tõmbetugevus

Klaaskiud on üks enim kasutatavaid kiudmaterjale, ligikaudu 90% kõigist kiudmaterjalidest on tehtud klaaskiududest. Vanim ja sagedaimini kasutatav on E-klass, mis on suure tugevuse ja elektrilise vastupidavusega. Klaaskiud koosnevad suures osas ränidioksiidist (SiO₂), millele lisatakse vastavalt vajadusele ka alumiiniumoksiidi (Al₂O₃), kaltsiumoksiidi (CaO), magneesiumoksiidi (MgO) ja nende lisaks väiksemas koguses ka muid lisandeid.

Laboritingimustes võivad kiud tõmbetugevust vastu võtta kuni 7000 N/mm^2 , kuid turule mineva klaaskiu tugevus on vahemikus $2800\text{--}4800 \text{ N/mm}^2$. [9]

1.2.2. Süsinikkiud

Kõigist kiudmaterjalidest on suurima tugevusega süsinikkiud. Lisaks on süsinikkiududel omadus säilitada oma tõmbetugevus ka kõrgetel temperatuuridel ja kiudude tugevus ei sõltu niiskusest. Erinevalt klaaskiududest ja teistest orgaanilistest polümeerkiududest ei pruugi süsinikkiud pingel all puruneda. Süsinikkiud on suure elektri- ja soojusjuhtivusega, aga sealjuures madala joonpaisumisteguriga. Süsinikkiud on maksimaalse tõmbetugevusega 7 GPa ja sellest $10\text{--}60\%$ on teljesihiline survetugevus. [10]

1.2.3. Aramiidkiud

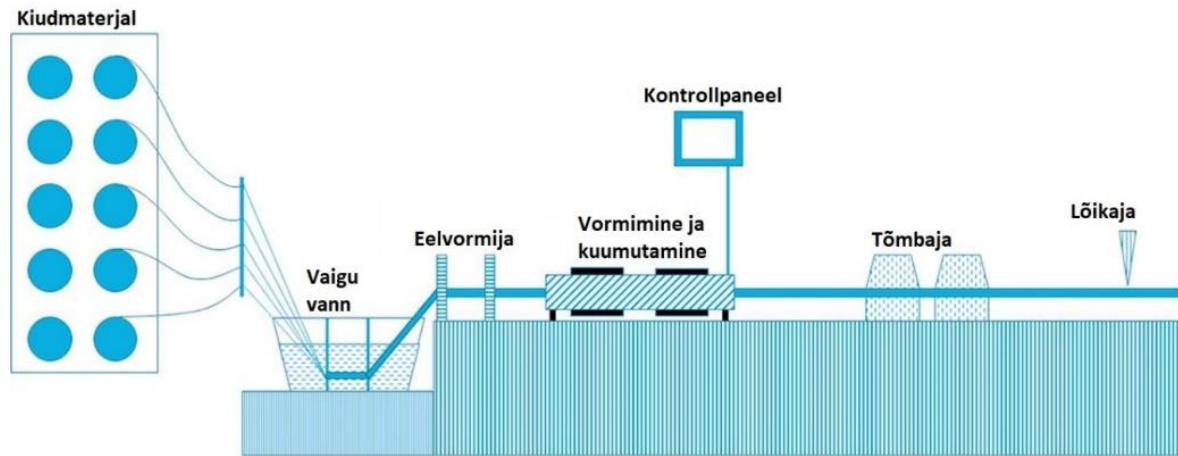
Aramiidi kui kiudmaterjali hakati tootma 1960ndatel [9], alternatiivseks materjaliks metallkiududele rehvides. Lisaks leiti, et aramiidkiud on sobilikud ka ballistika ja asbesti asendajaks. Neid kiudusid kasutatakse suures osas siis, kui on vaja suure jõudlusega komposiitset lahendust, millel oleks kerge kaal, suur tugevus ja jäikus. Kõige sagedamini leiab aramiidkiud kasutust kuulivestide, külmkambriga veokite ning laevakerede valmistamisel. Aramiidkiudude tõmbetugevus eri liikide vahel jääb vahemikku $3,4\text{--}4,1 \text{ GPa}$.

1.3. Polümeerkiudsarruse tootmine

Polümeerkiudsarruse tootmiseks on levinud kolm peamist protsessi: pultrusioon, punumine ja põimimine [7].

Pultrusiooni protsessi [8] käigus käib kiudude tugevdamine lindina, mille esimeseks osaks on sobiliku viskoossusega vaiguvann. Seejärel läbib materjal eelvormija, kus liigne vaik eemaldatakse ja saavutatakse soovitud kuju. Materjal tõmmatakse läbi soojendusbloki, kus toimub kõvenemine. Enamasti toimub soojendusblokis mitu soojendamist eri

temperatuuridega. Lõpetuseks tõmmatakse materjal välja ja lõigatakse soovitud pikkusesse. Materjali tegemise käigus saab muuta protsessi kiirust, soojendamise tee pikkust ja temperatuuri. Joonisel 2 on kujutatud pultrusiooniprotsessi.



Joonis 2. Pultrusiooni tootmisprotsess [8].

Punumisprotsessi käigus punutakse kaks või enam kiudu kokku, moodustades ühtse struktuuri [7].

Põimimisprotsessi käigus immutatakse kiud vaigus, seejärel keritakse need ümber koonusekujulise toru ning lõpetuseks kontrollitakse kiudude paksust, keerunurka ja fraktsioone. Lõppsaadust kuumutatakse. Levinumad tooted selle protsessi käigus on torud ja mahutid. [7]

1.4. Kiudude sidusaine

Sidusainel on kiudsarruse valmistamisel tähtis osa, sest sidusaine füüsikalised ja termilised omadused mõjutavad olulisel määral nii mehaanilisi omadusi kui ka tootmisprotsessi [7].

Sidusainet komposiidis saab lugeda nii struktuuri osaks kui ka kaitsekomponendiks. Sidusaine peamiseks ülesandeks on ühendada kiud kokku, juhtida ja jaotada jõud kiududele ja kaitsta kiudusid keskkonnamõjude ning mehaanilise hõõrdumise eest. Peamiselt on levinud kaks erinevat sidusainet: termokõvenevad ja termoplastsed vaigud. [11]

1.4.1. Termokõvenevad vaigud

Termokõvenevad vaigud on madala viskoossusega, mis võimaldab kiudude hea märgumise. Neid vaike on lihtne töödelda ja need on madala maksumusega. Põhilised termokõvenevad vaigud on polüester, epoksiid ja vinüülester. Nende vaikude tüüpnäitajad on esitatud tabelis 3. [11]

Tabel 3. Termokõvenevate vaikude mehaanilised näitajad [11]

Omadus	Vaigu tüüp		
	Polüester	Epoksiid	Vinüülester
Tihedus kg/m ³	1200–1400	1200–1400	1150–1350
Tõmbetugevus MPa	34,5–104	55–130	73–81
Elastsusmoodul GPa	2,1–3,45	2,75–4,10	3,0–3,5
Poisson'i tegur	0,35–0,39	0,38–0,40	0,36–0,39
Joonpaisumistegur 10 ⁻⁶ /°C	55–100	45–65	50–75
Niiskusesisaldus %	0,15–0,60	0,08–0,15	0,14–0,30

Polüestervaik [11] on madala viskoossusega vedelik, mis põhineb küllastamata polüestril. Polüestrid on hea vastupidavusega UV-kiirguse suhtes ja sobivad kasutamiseks agressiivses keskkonnas. Polüestervaigu miinuseks on suur mahukahanemine, mida on võimalik vähendada termoplastsete komponentide lisamisega.

Epoksiidvaigu [11] peamised eelised on kõrged mehaanilised näitajad, kerge töötlemine, väike kokkutõmbuvus kõvenemise ajal ja hea haardumine mitmesuguste kiududega. Neil on kõrge korrosioonikindlus ning need on vee ja kuumuse suhtes kindlamad kui teised vaigud. Epoksiidvaigu puuduseks võib lugeda kõrge maksumuse ja pika kuivamisaja.

Vinüülestervaik [11] on valmistatud akrülaatide ja metakrülaatide baasil. Vinüülestervaigu keemilise struktuuri tõttu tekib selle tootmisel vähem ristühendeid, need on paindlikumad ja neil on kõrgem purunemiskindlus kui polüestril. Vinüülestervaigu miinuseks on see, et võrreldes epoksiidvaiguga on see suurema mahukahanemise ja väiksema nakketugevusega.

1.4.2. Termoplastsed vaigud

Termoplastsed vaigud [11] on esialgu tahkes olekus ja protsessi käigus neid kuumutatakse. Need saavutavad oma esialgse oleku jälle pärast jahtumist. Selle käigus ei toimu ühtegi keemilist protsessi. Termoplastsed vaigud on töötlemise käigus kõrge viskoossusega ning seetõttu on neid raske töödelda. Levinumad termoplastsed vaigud on polüetereeterketoon (PEEK), polüsulfoon (PSUL) ja polüfenüleenisulfiid (PPS) ning nende vaikude mehaanilised omadused on toodud tabelis 4.

Tabel 4. Termoplastsete vaikude mehaanilised omadused [11]

Omadus	Vaigu tüüp		
	PEEK	PPS	PSUL
Tihedus kg/m ³	1320	1360	1240
Tõmbetugevus MPa	100	82,7	70,3
Elastsusmoodul tõmbel GPa	3,24	3,30	2,48
Pikenemine tõmbel %	50	5	75
Poissoni tegur	0,40	0,37	0,37
Joonpaisumistegur 10 ⁻⁶ /°C	47	49	56

PEEK on kõige levinum termoplastne vaik, millel on kõrge murdumiskindlus. Sellel vaigul on väga madal veeimavus toatemperatuuril. PPS on väga hea keemilise vastupidavusega. PSUL on vastupidav pikenemisele ning kõrge stabiilsusega kuumas ja märjas keskkonnas. [11]

1.5. Klaasplastsarrus Armastek

Käesolevas magistritöös on katsed sooritatud klaasplastsarrusega Armastek, mida turustab Eestis OÜ Donleon.

Armasteki klaasplastarmatuurist sarrus [12] koosneb klaaskiust ja polümeerepoksiidist ning selle läbimõõt jääb vahemikku 4–20 mm. Sarrusele tagab nakke seda ümbritsev spiraalne profiil. Materjali pikkust on võimalik toota vastavalt vajadusele, kuid transpordiks on mugav

kasutada enamasti 50–100 meetriseid rulle. Klaasplastsarrus kuulub madalasse ohukategooriasse, mistõttu on see kokkupuutel inimkeha ja loodusega mittetoksiline. Toode on võimalik kasutada eelpingestatult ja pingestamata betooni paigaldatuna ning teede-, sildade ja sadamaehituses, sest nendes kohtades on suur korrosioonioht. Joonisel 3 on toodud välja Armasteki poolt toodetavad klaasplastsarruse näidised.



Joonis 3. Armasteki klaasplastsarruste näidised [12].

Klaasplastsarruse Armastek ja terassarruse A-III (A400C) omaduste võrdlus on esitatud tabelis 5.

Tabel 5. Klaasplastsarruse ja terassarruse A-III võrdlus [13]

	Klaasplastsarrus Armastek	Terassarrus A-III (A400C)
Tõmbetugevus MPa	1000	390
Venivus %	2,2	25
Elastsusmoodul MPa	50 000	200 000
Elektrijuhtivus	Mittejuhtiv	Juhtiv
Korrosioonikindlus	Mittekorrodeeruv	Korrodeeruv
Tarnitav pikkus	Vastavalt tellija soovile	6-12 meetrine latt
Vastupidavus	Eeldatavalt 80 aastat	Vastavalt ehitusmäärusele

Komposiitmaterjale kasutatakse tsiviil- ja tööstushoonete ehitamisel selleks, et tugevdada vundamente, põrandaid ja talasid [13].

Tootja andmete võrdluseks on tabelis 6 toodud Tallinna Tehnikaülikoolis 2013. aastal tehtud katsete tulemused: klaasplastsarruse Armasteki elastsusmoodul, tõmbetugevus, pikenemine ja tihedus.

Tabel 6. Tallinna Tehnikaülikoolis saadud klaasplastsarruse katsetulemused [14]

Omadus	Klaasplastsarrus AKC läbimõõt mm		
	5	6,5	14
Tihedus kg/m ³	2070	2060	2040
Tõmbetugevus MPa	1584	1506	1320
Pikenemine %	2,7	2,5	1,6
Elastsusmoodul MPa	$58,4 \times 10^3$	$60,5 \times 10^3$	$69,9 \times 10^3$

(* Katsed tehti ainult ühe katsekehaga)

Võttes võrdluse alla tootja poolt antud andmed ja Tallinna Tehnikaülikoolis saadud tulemused, siis näeme, et need erinevad teineteisest. Katseliselt saadud elastsusmoodul 6,5 mm läbimõõduga katsekehal on 17% suurem kui tootja poolt esitatud andmetes. Lisaks on katseliselt leitud tõmbetugevus 33% suurem kui tootja andmetes. Katseliselt saadud tulemused on suuremad, kui tootja poolt esitatavad näitajad.

1.6. Ülevaade eelnevatest uurimistöödest

Järgnev peatükk käsitleb uurimistööd „Flexural behaviour of GFRP reinforced high and ultra high strength concrete beams“ („Klaaskiudsarrusega tugevdatud suure ja ülisuure tugevusega betoontalade läbipainde uurimine“), mille autorid on M. W. Goldston, A. Remennikov ja M. Neaz Sheikh [15]. Järgnevalt antakse ülevaade uurimistöö katse metoodikast ja tulemustest.

Vaadeldud uurimistöös olevad klaaskiudsarrusega tugevdatud betoontalad olid kõrgusega 100 mm, laiusega 150 mm ning pikkusega 2400 mm. Kolm katsekeha tehti tugevusega 80 MPa ja kolm 120 MPa. Klaaskiudsarrustest oli kasutuses kolme eri läbimõõduga sarruseid: 6,35, 9,53 ja 12,7 mm. Kaitsekihiks valiti igast küljest 15 mm. Lisaks

klaaskiudsarrusele kasutati põiksuunas armeerimiseks 4 mm läbimõõduga terasest range. Töös sooritati kolme punkti katse, kus koormamine toimus katsekeha keskele (joonis 4).



Joonis 4. Kolme punkti katse skeem [15].

Katsetamise käigus kujunes välja kaks purunemisviisi, millest esimene toimub sarruse purunemise tõttu ning teisel juhul andis järele betoonist kaitsekiht. Tabelis 7 on toodud katses saadud tulemused.

Tabel 7. Klaaskiudsarrusega betoontalade katsetulemused [15]

GFRP tala (purunemise viis)	Pragude tekkimise koormus kN	Kandevõime kN	Kesklõike läbipaine mm
80-#2-0,5 (varda purunemine)	3,1	15,0	81,8
80-#3-1,0 (betooni purunemine)	3,8	33,0	62,6
80-#4-2,0 (betooni purunemine)	4,0	46,1	58,3
120-#2-0,5 (varda purunemine)	3,3	16,2	77,5
120-#3-1,0 (betooni purunemine)	3,5	41,8	73,3
120-#4-2,0 (betooni purunemine)	3,0	52,2	64,3

Uuriti, kuidas betooni tugevus mõjutas kandevõimet, läbipainet, jäikust ja energia neeldumist. Suure ja ülisuure tugevusega betoonil näitas 0,5% tugevdussuhtega katsekeha minimaalset mõju katsekeha mõõtmetele. Kahe betooniklassi vaheline kandevõime erinevus oli 8%. Põhjuseks oli see, et need katsekehad olid alatugevdatud ja seetõttu purunesid katsekehades vardad. Keskkoha läbipaine erines 5% ja praod tekkisid 12% erinevusega.

Tugevamatel katsekehadel, mille tugevdussuhe oli 1,0% ja 2,0%, oli rohkem mõju ületugevdamisel. Seetõttu purunesid katsekehadel betoonist kaitsekihid, mitte vardad. Katsekehade kandevõime erinevate betoonide vahel suurenes 27% ning keskkoha läbipaine suurenes 17%.

Kokkuvõttes võib öelda, et olenemata betooni tugevusest hakkab pärast pragude teket paindetugevus vähenema. Betooni tugevusklassi suurendades, kuid sama armeeringut kasutades ei erinenud katsetel paindemomendi väärtus pärast pragude tekkimist. Katsetulemused näitasid, et kandevõime tõstmisel oli ülitugeva betooni kasutamine kasulikum kui nõrgema betooni puhul. Leiti, et kesklõike läbipaine suurenes koos betooni tugevuse suurenemisega, kui kasutati sarnast armeeringut.

1.7. Näiteid polümeerkiudsarruse kasutamisest

Järgnev peatükk räägib polümeerkiudsarruste kasutamisest erinevates konstruktsioonides. Esimene näide on komposiitide kasutamisest silla konstruktsioonis. Järgnev info on võetud artiklist „FRP Composites and Their Using in the Constructuon of Bridges“ („Sillakonstruktsioonid ja neis kasutatavad polümeerkiudsarruse komposiidid“) [16].

Sildade struktuuriosad on tehtud enamasti pultrusiooni protsessi käigus. Enamasti on sildade kandeelementideks terasprofiilid, kuid uus ehitusviis on kohandatud nii, et oleks võimalik kasutada ka polümeerkiududest komposiite. Kiudude kasutamise ainukeseks piiravaks osaks võib kujuneda elemendi paksus, teised mõõtmed on vastavalt tootja võimalustele. Vaigu kuumtöötlemine on eksotermiline ja suurel paksusel võib tekkida probleem kõrge kuumusega, mis võib kaasa tuua iseenesliku põlemise. Polümeerkiudsarrus traadi kujul on materjal, mis on heade omadustega kaablite jaoks, nagu kõrge väsimustugevus, väike kaal, suur tõmbetugevus ja hea keemiline vastupidavus. Joonisel 5 on toodud näide, kus polümeerkiude kasutatakse vana silla tugevdamiseks.



Joonis 5. Silla tugevdamine süsinikkiust ribadega [17].

Terast saab asendada polümeerkiudude komposiitidega, peamiselt kohtades, kus betoon on avatud ilmastikule [16].

Polümeerkiudsarrus on lisaks korrosioonikindlusele veel ka dielektrik ja see ei magnetiseeru, mis annab võimaluse seda kasutada trammidepoode ehitamisel ning lisaks aitab see vältida elektromagnetilise induktsiooni teket.

Teraskonstruktsioonid võivad oma magnetväljadega segada elektroonikat ning seetõttu nende kasutamist välditakse kohtades, mis nõuavad magnetilist neutraalsust nagu suured elektrimootorid, magnetraudtee konstruktsioonid, magnetilised skannerid [11].

Jaapanis on kasutusel magnethõljukraudteed, mis on näidatud joonisel 6.



Joonis 6. Magnethõljukraudtee süsteem Jaapanis [11].

Elektromagnetilised lained on aina enam segavaks teguriks, eriti mobiilsideoperaatoritele ja kaitsetööstusele, sest nendes tööstusharudes suureneb aja jooksul signaale väljastavate ja vastuvõtivate seadmete kasutus. Magnetiline neutraalsus polümeerkiudsarrusel teeb selle kasutamise ideaalseks ka haiglate ruumides, kus kasutatakse magnetresonantstomograafia masinat [11].

1.8. Magistritöö eesmärk

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on klaasplastsarrusega Armastek tugevdatud betoonalade läbipainde uurimine erinevate sarruste läbimõõtude ja erinevate kaitsekihtide korral.

Töö eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised ülesanded:

- 1) valida katsekehad, kombineerides erinevaid sarruste läbimõõte ja erinevaid betoonist kaitsekihte;
- 2) uurida, kas sarnase nakkepinnaga, kuid eri läbimõõduga sarrustega katsekehadel on sarnased tugevus- ja jäikusnäitajad;
- 3) kuna klaasplastsarruse elastsusmoodul on terase omaga võrreldes ligikaudu neli korda väiksem, siis antud töös selgitatakse välja, kui suurte koormuste korral saavutavad katsekehad lubatud läbipainde;
- 4) selgitada välja sarruste optimaalne kaitsekiht ja nakkepind.

Töö eesmärkide saavutamiseks valitakse katseseeriad ning viiakse läbi nelja punkti paindekatsed, analüüsitakse katsetulemusi ja tehakse järeldusi.

2. KLAASPLASTSARRUSEGA ARMEERITUD TALADE PAINDEKATSE

2.1. Katse metoodika

2.1.1. Katsekehad

Katsekehade valmistamiseks võeti aluseks standard EVS-EN 12390-1:2012. Katsekeha lühema külje pikkuseks võeti 150 mm, ristlõikega 150×150 mm. Seda arvestades tohib vastavalt standardile pikemaks küljeks võtta $L \geq 3,5d$ (d on katsekeha ristlõike laius) [18]. Seda arvestades on külje minimaalseks pikkuseks 525 mm.

Võttes arvesse standardis antud minimaalseid nõuded, valmistati katsekehad mõõtmetega 150×150×600. Katsekehasid valmistati seitse seeriat (vt lisa 1). Katsekehade valmistamiseks kasutati AS TMB Element tootmishoones olevat köetavat aluslauda, mille peale paigaldati puidust raketis ning seejärel asetati vormidesse klaasplastsarrused (vt lisa 2a). Sarruse vajumise takistamiseks asetati iga varda alla kaks kandurit. Vormid valmistati vastavalt standardile EVS-EN 12390-2:2009. Vormi nakkumise vältimiseks kaeti sisepind õhukese mineraalõliga [19]. Seejärel täideti vormid 1/5 mahust, et fikseerida sarrused betoonis. Järgnevalt täideti vormid täielikult betooniga ja tihendati tihendamispulgaga. Katsekehasid valati korraga kaks seeriat, seejärel lasti kivistuda üks ööpäev ning eemaldati vormidest (vt lisa 2b). Katsekehade valmistamiseks kasutati betoonsegu C35/45 (vt lisa 3). Kokku valmistati 35 katsekeha, milles kasutati kolme erineva läbimõõduga sarruseid ja erinevaid kaitsekihte. Katsekehade eristamiseks märgistati need numbritega 1–7 (tabel 8).

Tabel 8. Katsekehade kirjeldus ja valamise andmed

Märgistus	Kogus	Valamise kuupäev	Vette panemise kuupäev	Sarrus	Kaitsekiht mm
Seeria 1 (1-1-1-5)	5	09.01.2018	10.01.2018	2×ø8	40
Seeria 2 (2-1-2-5)	5	09.01.2018	10.01.2018	2×ø8	30
Seeria 3 (3-1-3-5)	5	10.01.2018	11.01.2018	2×ø8	15
Seeria 4 (4-1-4-5)	5	10.01.2018	11.01.2018	2×ø10	15
Seeria 5 (5-1-5-5)	5	11.01.2018	12.01.2018	2×ø6	30
Seeria 6 (6-1-6-5)	5	11.01.2018	12.01.2018	2×ø6	15
Seeria 7 (7-1-7-5)	5	12.01.2018	15.01.2018	4×ø6	15

Katsekehad transporditi pärast valmimist AS TMB Element tootmistsehhist Eesti Maaülikooli konstruktsioonide laborisse, kus neid hoiti niiskes keskkonnas. Katsekehad võeti kõik samal ajal niiskest keskkonnast välja. Esimesed katsekehad olid vees 38 päeva ja viimased katsekehad 32 päeva.

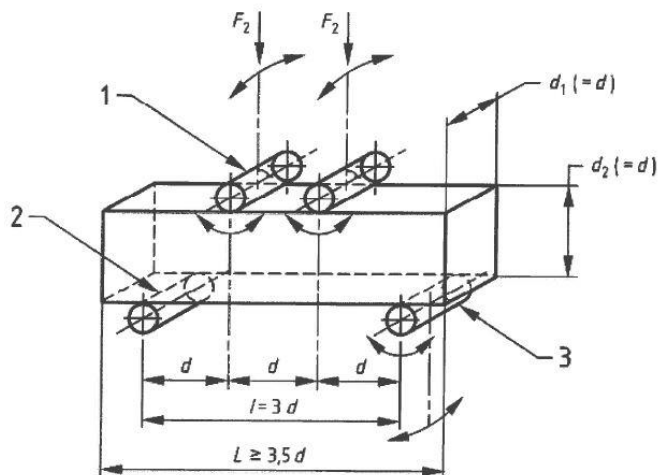
Katsekehasid mõõdeti enne katsete alustamist mõõdulindi ja nihkkaliibriga.

2.1.2. Katse käik

Katsete teostamisel lähtuti standardist EVS-EN 12390-5:2009, mille põhimõte on rakendada prismakujulisele katsekehale paindemoment, koormates seda läbi rullide, mis asuvad üleval ja all. Seejärel registreeritakse suurim vastuvõetav koormus ja arvutatakse paindetõmbetugevus.

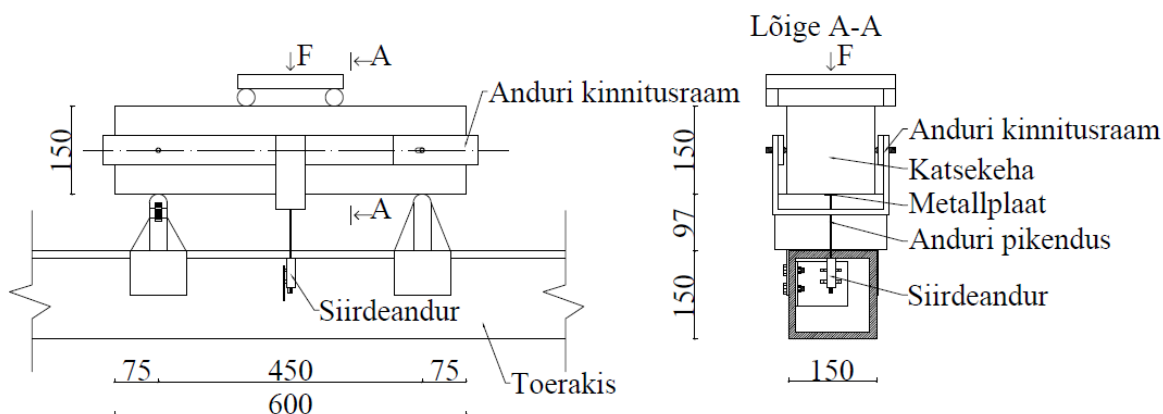
Koormamisseadmele (joonis 7) on esitatud nõue, et see peab koosnema kahest tugirullist ja kahest ülemisest rullist, neid ühendav vahelüli jaotab rakendatud jõu ühtlaselt mõlema rulli vahel. Kõik rullid peavad olema terasest ringikujulise ristlõikega ning nende läbimõõt peab jääma vahemikku 20 kuni 40 mm. Rullid peavad olema piisavalt pikad, et nad ulatuksid vähemalt 10 mm üle katsekeha laiuse. Kahel ülemisel ja ühel alumisel rullil peab olema võimalik pöörduda nii ümber oma telje kui ka katsekeha pikitelje risttasapinnas. Välimiste rullide telgede vahe peab võrduma 3d-ga, kus d on katsekeha laius ja sisemiste rullide vahe

võrdub d -ga. Sisemised rullid peavad olema paigutatud võrdselt välimiste rullide vahele (joonis 7). Rullid tuleb sättida vastavalt joonisele 7 ja nende täpsus peab olema $\pm 2,0$ mm. [20]



Joonis 7. Katsekehade koormamisskeem paindekatsel [20].

Läbipainde mõõtmiseks kasutati siirdeandurit, mis oli ühenduses arvutiga. Katses saadud andmed salvestati arvutitarkvaraga MTS. Siirdeandur kinnitati rakise külge, mis paigaldati surve-tõmbe nulljoonele (joonis 8). Esimestel katsekehadel mõõdeti läbipainet kuni nelja millimeetri saavutamiseni ning pärast esimest seeriat mõõdeti kolme millimeetri saavutamiseni, et vältida anduri kahjustamist. Pärast soovitud läbipainde saavutamist eemaldati andur ning jätkati koormamisega kuni katsekeha purunemiseni.



Joonis 8. Katseskeem läbipainde mõõtmiseks.

Katse käigus jälgiti, et koormamisrullide ja katsekeha vahelised pinnad oleksid kogu pikkuse ulatuses ühtlaselt kokku surutud. Pärast igat katset puhastati pinnad üleliigsest lahtisest betoonist, et see ei mõjutaks katses saadud tulemusi. Katsekeha paigutati rakisele vastavalt

standardis esitatud nõuetele. Ülemised rullid asetsevad üksteisest 150 mm ja alumised rullid 450 mm kaugusel.

Kui läbipaine võib kahjustada teisi vaadeldava konstruktsiooniga seotud elemente, siis pärast viimaste paigaldamist lubatav konstruktsiooni läbipaine sõltub kahjustava elemendi või materjali iseloomust ja enamasti loetakse vastuvõtvaks suuruseks järgmist suhet [21]:

$$F_{k,adm} = l_{eff}/500, \quad (1)$$

kus

l_{eff} – elemendi arvutussille mm;

$F_{k,adm}$ – lubatud läbipaine mm.

Seda võrrandit kasutades on kasutuspiiriseisundis katsekehade lubatavaks läbipaindeks 0,9 mm. Katsekehasid koormati kuni kolme millimeetrise läbipaindeni, et saada ülevaade läbipainde suurenemise käigust. Lisaks fikseeriti kõikidel katsekehadel läbipaine 0,9 mm juures, et välja selgitada, mis koormuse juures tekib lubatud läbipaine.

Kolme millimeetri läbipainde saavutamisel, eemaldati andur, et seda edasise koormamise juures mitte kahjustada. Seejärel koormati katsekehasid kuni purunemiseni. Saadud kandepiiriseisundi järgi leiti paindetõmbetugevused.

Paindetõmbetugevused arvutatakse valemiga [20]:

$$f_{cf} = Fl/(d_1 d_2^2), \quad (2)$$

kus

f_{cf} – paindetõmbetugevus MPa;

F – maksimaalne koormus N;

l – tugirullide telgede vahe mm (meie katses 450 mm);

d_1 ja d_2 – katsekeha ristlõike mõõtmed mm.

Paindetõmbetugevus esitatakse täpsusega 0,1 MPa.

3. KATSETULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Katsekeha läbipaine

Siinse töö eesmärk oli klaasplastsarrusega betoonist talade paindetugevuse ja läbipainde uurimine. Katses kasutati erineva läbimõõduga sarruseid. Katsekehad valmistati selliselt, et neid oleks võimalik hiljem võrrelda tulepüsivuskatsetel saadud tulemustega. Selleks paigaldati taladesse sarrused erinevate kaitsekihtidega. Minimaalseks kaitsekihiks valiti 15 mm ja maksimaalseks 40 mm. Läbipaindeid fikseeriti kuni kolme millimeetrini. Peamiseks põhjuseks oli katsekeha purunemine sellel läbipaindel, Samuti taheti vältida anduri kahjustamist. Igal katsekehal võrreldi läbipaindeid koormustel 12,5, 25, 37,5, 50, 62,5, 75 ja 87,5 kN (vt lisa 4). Kõikide seeriade kohta on koostatud paindediagrammid (vt lisa 6). Esimesel seerial ja teise seeria kahel katsekehal on läbipaindeid vaadeldud kuni nelja millimeetrini ja sellest edasi kuni kolme millimeetrini (vt lisa 4).

Lisas 6 esitatud graafikutel on kujutatud eri sarrustega tugevdatud viie katsekeha paine erinevate koormusete korral. Kõikidelt graafikutelt näeme, et kuni betooni maksimaalse tõmbetugevuse saavutamiseni on läbipaine peaaegu samasugune. Kui betoon enam koormusi vastu ei võta, siis kandub koormus sarrusele ja sellest edasi hakkasid katsekehade läbipainded erinema.

Katsetes kasutati kolmel korral sarrust $2 \times \varnothing 8$, kaitsekihtidega 15, 30 ja 40 mm. Seerias 2, 30-millimeetrise kaitsekihiga katsekehadel fikseeriti kahel katsekehal tulemus nelja millimeetrisel läbipaindel ja järgnevad kolme millimeetri saavutamisel. Katsekeha purunes sama koormuse juures, millega see saavutas otsitud läbipainde ning seetõttu otsustati anduri kaitsmiseks vähendada läbipainde vaatlust kolme millimeetrini. Antud katsekehad saavutasid nelja millimeetri korral koormuse tulemusteks 66,25 ja 72,50 kN ning kolme millimeetri korral jäi see vahemikku 68,75–72,50 kN. Seerias 1, millel oli 40-millimeetrine kaitsekiht, jäi koormus vahemikku 63,75–81,25 kN. Viimaseks vaadeldi 15-millimeetrise kaitsekihiga katsekehasid, mille koormused kolme millimeetri juures olid 56,25–75,00 kN.

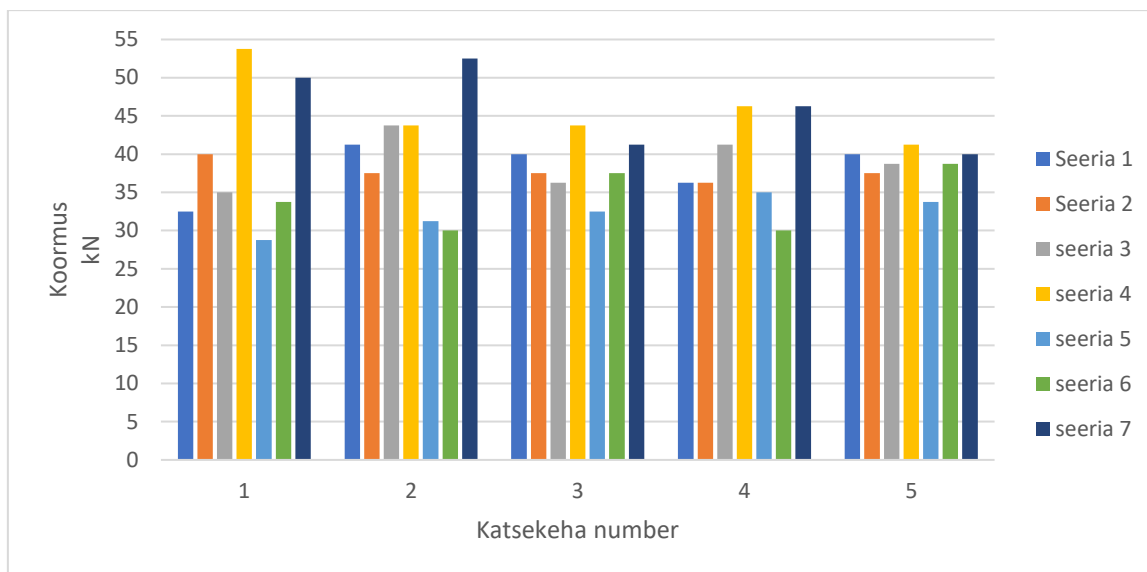
Vaatamata sellele, et vaadeldi nelja- ja kolmemillimeetrise läbipainde saavutamist, jäid katsetes saadud koormused lähestikku. Seeria 1 ja seeria 2 tulemused olid keskmise koormusega $69,00 \pm 9,01$ kN ja $69,75 \pm 3,36$ kN ning seerial 3, mis oli väiksema kaitsekihiga, jäi keskmiseks koormuse tulemuseks $66,0 \pm 8,53$ kN.

Järgmiseks oli vaatluse all sarrus $2 \times \emptyset 10$, kaitsekihiga 15 mm. Selle seeria koormused kolme millimeetri korral jäid vahemikku 62,50–93,75 kN ning keskmiseks koormuseks $76,75 \pm 13,83$ kN.

Viimaseks vaadeldi kuuemillimeetriliseid sarruseid $2 \times \emptyset 6$ ja $4 \times \emptyset 6$. Esimesel olid kaitsekihid 15 ja 30 mm ning teisel ainult 15 mm. Seeria 5, millel oli 30 mm kaitsekiht, olid tulemused vahemikus 42,5–53,75 kN ja seeria 6, kaitsekihiga 15 mm, oli tulemuseks 43,75–53,75 kN. Mõlema katseseeria keskmised tulemused kolmemillimeetrise läbipainde saavutamisel olid lähestikku, vastavalt $47,5 \pm 5,60$ ja $49,0 \pm 4,96$ kN. Lõpuks katsetati seeria 7 katsekehasid, mis olid 15 millimeetrise kaitsekihiga, ja nende tulemused jäid vahemikku 72,5–87,5 kN. Selle seeria keskmiseks tuli $78,75 \pm 9,25$ kN.

Tulemusi vaadates saame järeldada, et kõige paremini talub kolmemillimeetrise läbipainde saavutamisel koormust seeria 7, millel oli 15-millimeetrine kaitsekiht sarrusega $4 \times \emptyset 6$. Kõigest 2 kN kehvem keskmine tulemus on 10-millimeetrine sarrus sama paksu kaitsekihiga. Kõige halvemini peab vastu sarrus $2 \times \emptyset 6$, kaitsekihtidega 15 ja 30 millimeetrit, tulemustega $49,0 \pm 4,96$ kN ja $47,50 \pm 5,60$ kN. Lisaks määras läbipainde saavutamise juures suurt rolli pragude tekkimine. Nõrgematel katsekehadel tekkisid suuremad praod kiiremini ja seetõttu saavutasid kiiremini otsitud läbipainde.

Järgmiseks uuriti katsekehade 0,9 mm läbipaindel saadud koormusi (vt lisa 7) ning vastavad tulemused on välja toodud joonisel 9.



Joonis 9. Koormused lubatud (0,9 mm) läbipaindel.

Katsetulemused näitavad, et sama läbipainde korral on koormuste vahemik vastavalt 28,75–53,75 kN, mis sõltub nii varda läbimõõdust kui ka kaitsekihi paksusest. Vaadates katseseeriade keskmisi väärtusi on koormuste vahemik 32,25–46,0 kN.

Võtame vaatluse alla $2 \times \emptyset 8$ sarruse, kaitsekihtidega 15, 30 ja 40 mm. Antud katsekehade koormused olid 0,9 mm läbipainde saavutamises kõikvahemikus 32,5–43,75 kN. Nende keskmisteks tulemuseks tuli vastavalt $39,0 \pm 4,44$, $32,75 \pm 1,70$ ja $38,0 \pm 4,47$ kN.

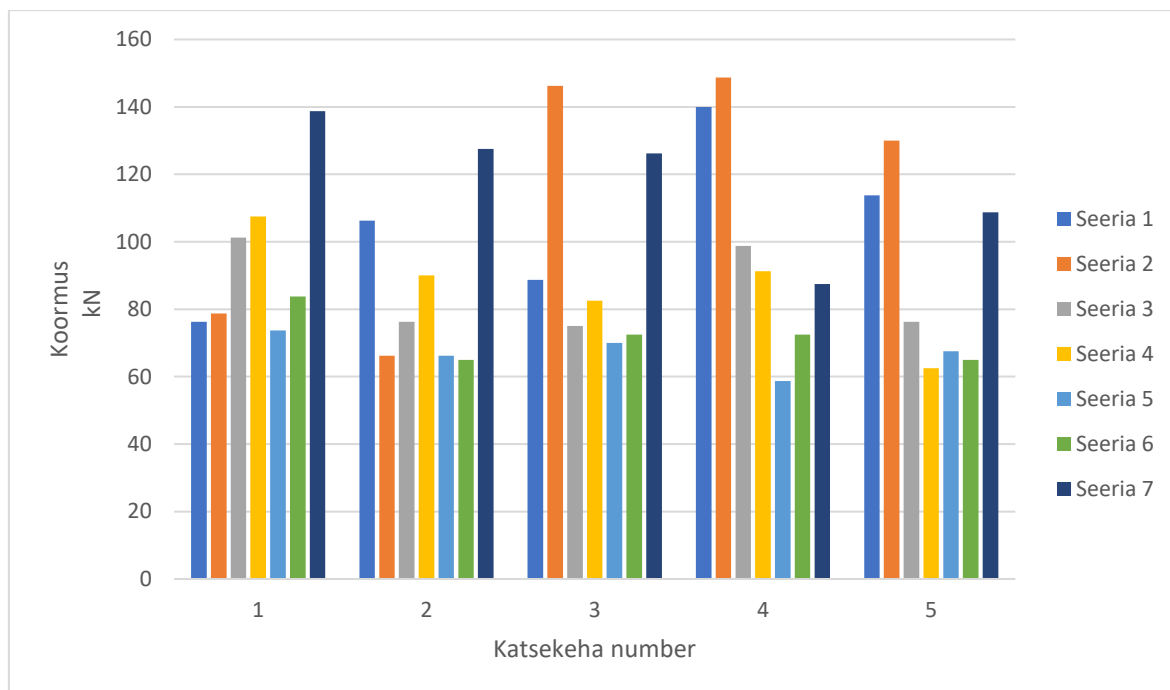
Järgmiseks sarrus $2 \times \emptyset 6$, kaitsekihtidega 15 ja 30 mm. Sarnaselt kaheksamillimeetrilisele sarrusele olid ka need katsekehad omavahelises võrdluses sarnaste koormuste tulemustega, mis jäid vahemikku 28,75–38,75 ning nende kahe seeria keskmisteks tulid $34,0 \pm 5,08$ ja $32,25 \pm 2,96$ kN.

Sarrused $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 10$, kaitsekihiga 15 mm, talusid purustavaid jõudusid 40,0–53,75 kN. Seeriade keskmisteks väärtusteks tulid $46,0 \pm 6,71$ ja $46,75 \pm 5,97$ kN.

Saadud tulemustest saab välja lugeda, et kõige paremini peavad maksimaalse lubatud läbipainde saavutamiseni vastu katsekehad $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 10$, kaitsekihiga 15 mm. Kõige kehvema tulemuse andsid kuuemillimeetrise sarrusega katsekehad ja seda kõikide kaitsekihtidega. Siinkohal saab välja tuua, et $2 \times \emptyset 10$ sarruse ristlõikepindala on $50\pi \text{ mm}^2$, mis on võrreldes sarrusega $4 \times \emptyset 6$ ligikaudu 30% suurem, aga läbipainde tulemused on sarnased. Võttes võrdluse alla $2 \times \emptyset 8$, mille pindala on $32\pi \text{ mm}^2$, ja sarruse $4 \times \emptyset 6$ pindalaga $36\pi \text{ mm}^2$, näeme, et nakkepind on sarnane, kuid läbipainde erinevus 0,9 millimeetri juures on 18%.

3.2. Katsekeha purustav koormus ja purunemisviisid

Paindetõmbetugevuse leidmiseks koormati katsekehasid kuni nende purunemiseni saadud tulemused on esitatud joonisel 10. Selle tulemusel saadi kandepiirseisundi suurim kandevõime (vt lisa 8). Katses saadud tulemused on esitatud katseprotokollis (vt lisa 5).



Joonis 10. Katsekehasid purustavad koormused.

Jooniselt 10 näeme, et katsekehad purunesid erineval koormusel, mis sõltus sarruse läbimõõdust ja kaitsekihi suurusel. Purustav jõud jäi vahemikku 58,75–148,75 kN.

Kõigepealt võeti vaatluse alla kaheksa millimeetrise läbimõõduga sarruse, kaitsekihtidega 15, 30 ja 40 mm.

Seerias 1, kus kaitsekihiks oli 40 mm, oli purustav koormus 76,25–140,0 kN. Katsekehad kaks, neli ja viis olid tugevamad ning andsid koormuse tulemuseks 106,25–140,0 kN. Antud katsekehade tüüpiliselt purunemispildilt (joonis 11a) on näha, et katsekehades on tekkinud suured praod ning lõpuks betooni purunemise tõttu paindus ka sarrus. Katsekehadel kaks ja neli purunes ka üks varrastest (joonis 11c) ning viiendal katsekehal libises varras betoonist välja ilma purunemata. Katsekehadel üks ja kolm on näha (joonis 11b), et tekkis üks suurem mõra, mille tulemusena andis üks sarrus järgi ja purunes. Nendel katsekehadel jäid koormuse tulemused vahemikku 76,25–88,75 kN.

a)



b)



c)



Joonis 11. Seeria 1 katsekehade purunemispildid.

Seeria 2 katsekehad 30-millimeetrise kaitsekihiga jagunesid samuti kahte rühma. Esimesed (joonis 12a), mis purunesid väiksema koormusel 66,25–78,75 kN, ja teised (joonis 12c), mis purunesid koormustel 130,0–148,75 kN. Katsekehade üks ja kaks purunemispildilt näeme, et on tekkinud üks diagonaalne mõra ülemise toe kohalt alumise toeni, mille tulemusena andis üks varrastest järgi ja katsekeha purunes. Varras, mis ei purunenud, vajus läbi kaitsekihi (joonis 12b). Kolmas kuni viies katsekeha pidasid kauem vastu ning nende purunemispildil on näha, et mõrasid tekkis tunduvalt rohkem. Kolmandal katsekehal vajus kaitsekihi purunemise tõttu varras läbi, aga neljandal ja viiendal purunes üks varrastest. Samuti on näha (joonis 12d), et purunemata varras on libisenud ning varda pealmine struktuur on jäänud betooni kinni.

a)



b)



c)



d)



Joonis 12. Seeria 2 katsekehade purunemispildid.

Kaheksamillimeetrise sarruse viimased katsekehad olid 15 millimeetrise kaitsekihiga (seeria 3). Nende katsekehade purunemine toimus koormusvahemikus 75,0–101,25 kN. Antud katsekehad purunesid kõik sarnaselt (joonis 13a). Kandevõime kaotus on tingitud liiga õhukesest kaitsekihist. Kõikidel katsekehadel oli üks varrastest kaitsekihist läbi läinud (joonis 13a) ning teine varras libisenud betoonis järgi (joonis 13b). Katsekehad üks ja viis pidasid vastu kuni koormuseni 98,75–101,25 kN, mis tulenes sellest, et nendel katsekehadel jäid mõlema varda kaitsekihid rohkem hoidma ja kandevõime kaotus tulenes ainult varraste libisemisest (joonis 13c).

a)



b)



c)



Joonis 13. Seeria 3 katsekehade purunemispildid.

Järgnevalt katsetati kümne millimeetrist sarrust kaitsekihiga 15 millimeetrit (seeria 4). Selle seeria katsekehad pidasid vastu koormusi 62,5–107,5 kN. Katsekehad üks ja neli purunesid sarnaselt: liiga õhukese kaitsekihi tõttu (joonis 14a). Mõlemad vardad jäid terveks, kuid need suruti läbi kaitsva betooni. Katsekehad pidasid vastu vastavalt koormusteni 107,5 ja 91,25 kN. Teisel ja kolmandal katsekehal purunes üks varrastest ning need talusid koormust 82,5 ja 90,0 kN (joonis 14b). Viimane katsekeha purunes sarnaselt esimese ja neljandaga, aga see pidas vastu 62,5 kN. Katsekeha vähene kandevõime tulenes sellest, et esimene suur mõra tekkis katsekehale suure koormuse all ning pärast seda see rohkem lisakoormust vastu võtta ei jõudnud. Kõikidel katsekehadel tekkis mõra sarnaselt ühe toe poole, diagonaalselt ülevalt alla.

a)



b)



Joonis 14. Seeria 4 katsekehade purunemispildid.

Viimaseks oli valitud kuuemillimeetrised sarrused, kaitsekihtidega 15 ja 30 millimeetrit. Kahele varda asemel oli seerias 7 kasutatud nelja varrast, mille kaitsekihiks valiti 15 millimeetrit. Seeria 5 katsekehad 30-millimeetrise kaitsekihiga pidasid vastu koormusele 58,75–73,75 kN. Selle seeria kõik katsekehad purunesid sarnaselt: kõigil läksid mõlemad vardad puruks (joonis 15a) ning purunemine toimus peamiselt keskosa lähedalt (joonis 15b).

a)



b)



Joonis 15. Seeria 5 katsekehade purunemispildid.

Seeria 6 kaitsekihiga 15 millimeetrit talus koormusi 65,0–83,75 kN. Katsekehade kandevõime kadu toimus peamiselt liiga väikse kaitsekihi tõttu. Esimene ja viimane katsekeha purunesid sarnaselt ning neil murdus ka üks varrastest, teine oli libisenud. Esimene katsekeha pidas vastu 83,75 kN ja viimane 65,0 kN. Sealjuures on näha, et esimese katsekeha (joonis 16a) purunemise käigus on katsekeha rohkem kahjustunud, viimase katsekeha purunemine toimus peamiselt ühe suure mõra tekkimisest (joonis 16b). Katsekehade kaks kuni neli kandevõime kadu toimus sarnaselt. Kaitsekiht purunes (joonis 16c) ning samuti olid vardad libisenud sissepoole (joonis 16d). Need katsekehad pidasid vastu koormust 65,0–83,75 kN.

a)



b)



c)



d)



Joonis 16. Seeria 6 katsekehade purunemispildid.

Viimane seeria (nr 7) erines teistest varraste arvu poolest. Selles kasutati nelja kuuemillimeetrise läbimõõduga varrast, mis olid 15 millimeetrise kaitsekihiga. Need katsekehad valmistati selleks, et võrrelda neid kaheksamillimeetrise sarrusega, sest sarruse pindalad on suuruselt kõige lähedasemad. Selle seeria koormuse tulemused jäid vahemikku 87,5–138,75 kN. Antud juhul tekkis sama purunemispilt esimese kolme katsekeha puhul, kus katsekeha purunes peaaegu täielikult alumises kihis (joonis 17a). Kõik sarrused jäid terveks ja olid ühtlaselt kuni 20 millimeetrit sissepoole tõmmatud. Need katsekehad pidasid vastu koormuseni 126,25–138,75 kN. Neljandal katsekehal tekkis suur mõra ühele poole (joonis 17b) ning lisaks purunes ka üks varrastest (joonis 17c), seetõttu pidas see katsekeha vastu vaid koormuseni 87,5 kN. Viiendal katsekehal purunes kaitsekiht ning samuti tekkis üks suur mõra, kuid seda vaid ühele poole (joonis 17d). See katsekeha pidas vastu koormuseni 108,75 kN.

a)



b)



c)



d)

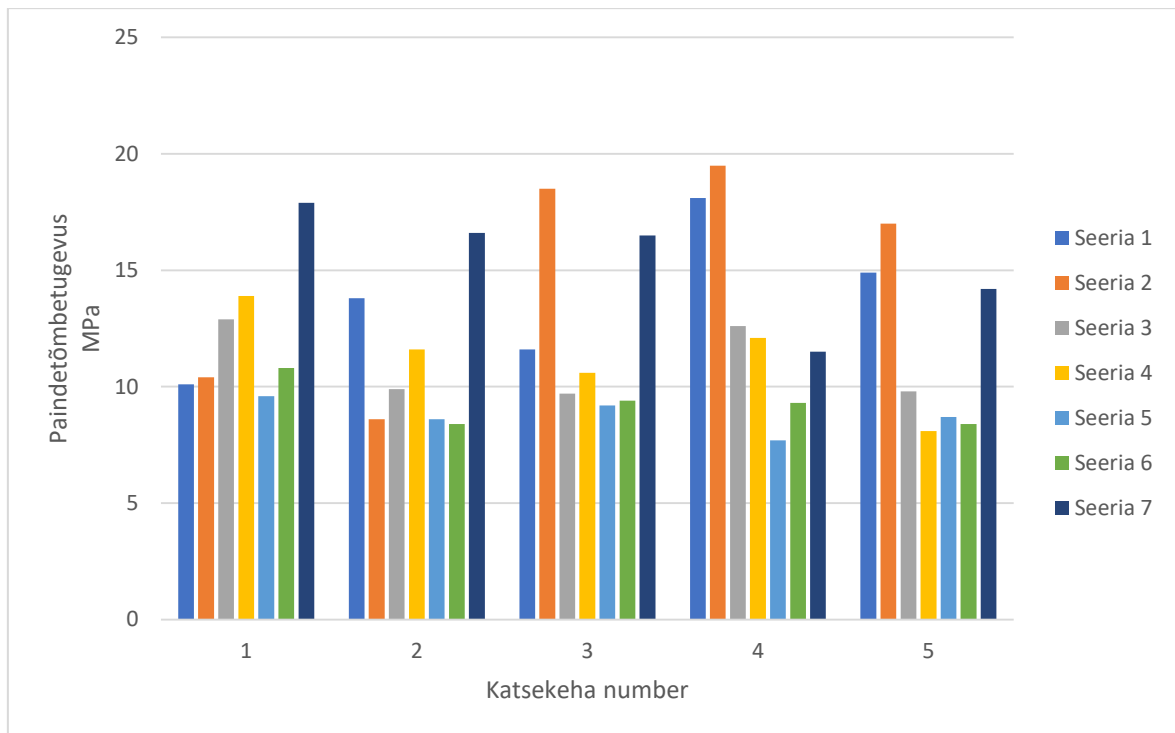


Joonis 17. Seeria 7 katsekehade purunemispildid.

Katsetulemused näitavad, et kõige ühtlasemalt purunesid $2 \times \emptyset 6$ sarrusega katsekehad 30 millimeetrise kaitsekihiga. Antud seeria kõige parema ja madalama tulemuse erinevus oli 10%. Kõige ebaühtlasema tulemuse andis sarrus $2 \times \emptyset 8$ 30 millimeetrise kaitsekihiga, mille tulemuste erinevus oli 55%. Sama sarrus kaitsekihiga 40 millimeetrit oli tulemuste erinevusega 46%, kuid parema tulemuste erinevuse 26% andsid 15-millimeetrise kaitsekihiga katsekehad. Kuuemillimeetrise sarrusega katsekehad kaitsekihiga 15 millimeetrit andsid tulemuste erinevuseks 22% ja nelja vardaga katsekehadel oli erinevus 37%. Katsetulemuste keskmisi vaadates olid kõige suurema tugevusega katsekehad $4 \times \emptyset 6$ 15-millimeetrise kaitsekihiga, millele järgnesid katsekehad $2 \times \emptyset 8$ 30-millimeetrise kaitsekihiga. Vastavad koormuste tulemused olid $117,75 \pm 24,87$ ja $114 \pm 48,19$ kN. Kõige madalama keskmise tugevusega olid katsekehad $2 \times \emptyset 6$ 30-millimeetrise kaitsekihiga ja nende koormuste keskmisteks tulemuseks $67,25 \pm 6,89$ kN. Katseprotokoll on esitatud lisa 5.

3.3. Katsekeha paindetõmbetugevus

Paindetõmbetugevuse leidmiseks tuli katsekehasid koormata kuni purunemiseni ning seejärel saadi teada kandepiirseisundi suurim kandevõime. Katsekehade paindetõmbetugevused on esitatud lisa 8 ja need arvutati valemiga 2. Vastavad väärtused on esitatud joonisel 18. Katses saadud tulemused on esitatud katseprotokollis (vt lisa 5).



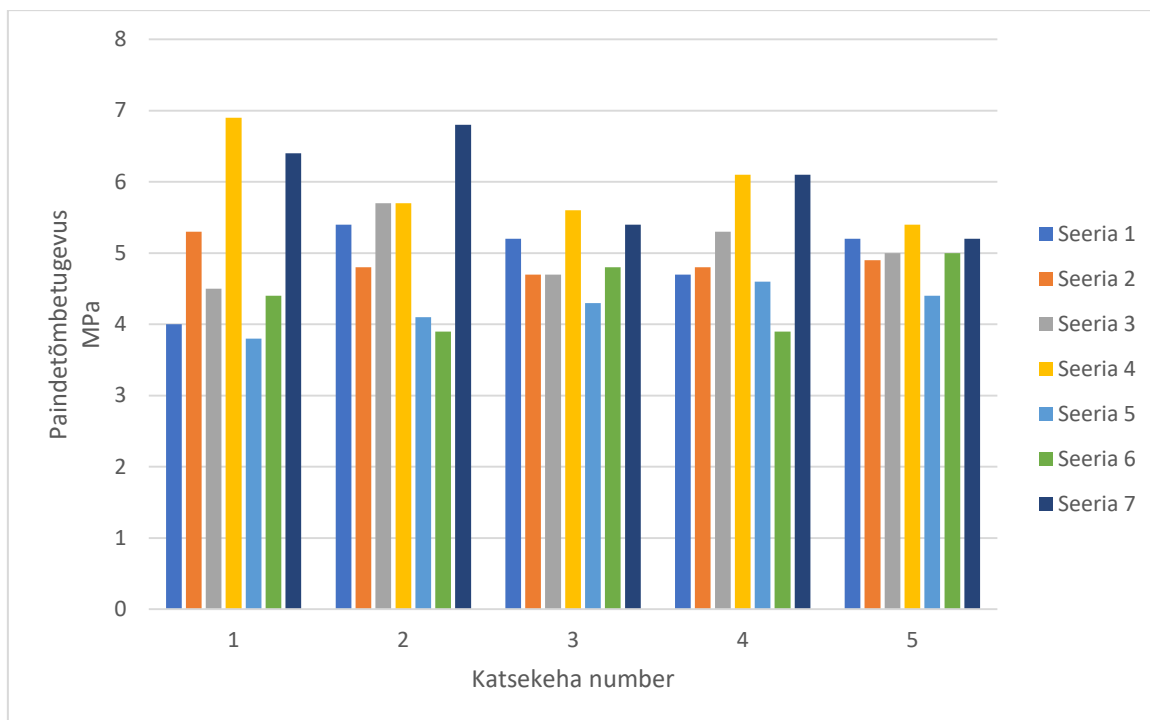
Joonis 18. Katsekehade paindetõmbetugevused.

Katse käigus teostati nelja punkti paindetõmbekatse, et välja selgitada eri sarruste ja eri kaitsekihiga betoontalade paindetõmbetugevused. Katseseeriade keskmiste väärtuste erinevust kontrolliti t-testiga.

Võtame vaatluse alla sarrused 4×6 ja 2×8 , sest nende katsekehade nakkepind on peaaegu võrdväärne. Katsekehadel sarrustega 4×6 ja 2×8 kaitsekihiga 15 millimeetrit selgus, et vastavad tugevuste keskmised väärtused $15,34 \pm 3,14$ ja $10,98 \pm 2,01$ kN on erinevad ning võib öelda, et seeria 7 katsekehad on tugevamad kui seeria 3 katsekehad. Kaheksamillimeetriseid sarruseid kaitsekihtidega 30 ja 40 millimeetrit seeriaga 7 võrreldes näitas t-test, et nende keskmised paindetõmbetugevused ei erine seeria 7 katsekehade paindetõmbetugevustest. Järeldusena saab öelda, et kuna seeria 1 ja 2 omavad sarnaseid keskmisi väärtusi võrreldes seeriaga 7, ei saa esile tuua katseseeriat, mis oleks tugevam.

Lisaks eeltoodule ei erine keskmised paindetõmbetugevuse väärtused t-testi järgi seeriatel 5 ja 6 ning 3 ja 4. Ülejäänud katseseeriade võrdluses tuleb selgelt välja, et paindetõmbetugevuste keskmised väärtused erinevad teineteisest.

Paindetõmbetugevust vaadeldi ka punktis, mille juures katsekehad saavutasid lubatud läbipainde 0,9 millimeetrit (vt lisa 7), saadud tulemused on esitatud joonisel 19. Katseseeriade paindetõmbetugevuste keskmiste väärtuste erinevust kontrolliti t-testiga.



Joonis 19. Paindetõmbetugevused 0,9 mm läbipainde juures.

Tulemustest on näha, et sarnase nakkepinnaga katsekehad $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 8$ kaitsekihtidega 15, 30 ja 40 millimeetrit andsid keskmisteks väärtusteks erinevaid tulemusi. Sellest saab järeldada, et katsekeha $4 \times \emptyset 6$ kaitsekihiga 15 millimeetrit on vastupidavam. Kaheksamillimeetrise sarrusega katsekehade keskmiste paindetõmbetugevuste väärtused olid vastavalt $5,04 \pm 0,59$, $4,90 \pm 0,29$ ja $4,90 \pm 0,70$ MPa. $4 \times \emptyset 6$ sarruse keskmine paindetõmbetugevus oli $5,98 \pm 0,83$ MPa. Kümne millimeetrise sarrusega ja 15-millimeetrise kaitsekihiga katsekehade keskmised väärtused andsid sarnased tulemused $4 \times \emptyset 6$ sarrusega, mida arvestades võib öelda, et need katsekehad on kõige suurema paindetõmbetugevusega 0,9-millimeetrise läbipainde juures. Kümne millimeetrise sarruse paindetõmbetugevuse keskmine väärtus oli $5,94 \pm 0,74$ MPa. Kõige nõrgema tulemuse andsid katsekehad $2 \times \emptyset 6$ kaitsekihtidega 15 ja 30 millimeetrit, vastavalt $4,40 \pm 0,63$ ja $4,24 \pm 0,38$ MPa.

3.4. Klaasplastsarruse Armastek hinna analüüs

Järgnev peatükk annab ülevaate klaasplastsarruse Armastek edasimüüja [22] hindadest ja nende omavahelisest võrdlusest. Tabelis 9 on toodud välja klaasplastsarruse hinnad.

Võrdlusesse on võetud magistritöös kasutatavad sarrused läbimõõtudega 6, 8 ja 10 millimeetrit.

Tabel 9. Klaasplastsarruse hinnad

Sarruse läbimõõt mm	Pikkus (1 rull) m	Rulli hind €	Jooksva meetri hind €
6	50	19,00	0,38
8	50	27,00	0,54
10	50	39,00	0,78

Siin toodud hinnad on esialgsed ja nende tegelik hind sõltub objektist ning tellitavast kogusest. Tabel 10 annab ülevaate selle magistritöö raames käsitletud, ühel katsekehal kasutatavatest varraste maksumusest.

Tabel 10. Magistritöös käsitletavate sarruste hinnad ühel katsekehal

Sarruse läbimõõt mm	Pikkus m	Varraste arv	Jooksva meetri hind €	Summa €
6	0,6	2	0,38	0,46
8	0,6	2	0,54	0,65
10	0,6	2	0,75	0,90
6	0,6	4	0,38	0,91

Katsetulemustest leidsime, et lubatud läbipainde keskmisteks väärtuseks sarrustel 2×Ø10 ja 4×Ø6 on kõrgeimad koormuse tulemused, seetõttu võime järeldada, et kõige mõistlikum on kasutada kuuemillimeetrist sarrust. Lisaks võrdsele läbipaindele peab kuuemillimeetrine sarrus paremini purustavale koormusele vastu ja seda materjali kulub küll rohkem, kuid suurema koguse juures saab eeldada suuremat soodustust.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös anti ülevaade polümeerkiudsarruse ajaloost, selle koostisosadest ja tutvustati lähemalt eri liiki kiudusid. Kirjeldati sarruse tootmisprotsessi ning anti ülevaade erinevatest vaikudest ja nende omadustest. Lisaks tutvustati lähemalt Armasteki klaasplastsarrust ja toodi selle omaduste võrdlus terassarrusega. Magistritöö eesmärk oli klaasplastsarrusega Armastek tugevdatud betoontalade läbipainde uurimine erinevate sarruste läbimõõtude ja kaitsekihtide korral. Kuna klaasplastsarruse elastsusmoodul on terasega võrreldes ligikaudu neli korda väiksem, siis antud töös selgitati välja, kui suurte koormuste korral saavutavad katsekehad lubatud läbipainde. Töös viidi läbi paindetõmbetugevuse katsed, analüüsiti katsetulemusi ning leiti optimaalne kaitsekihi paksus ja sarruse läbimõõt.

Polümeerkiudsarrustest vaadeldi selle töö raames klaasplastsarrust Armastek ning seda kasutati läbimõõtudega 6, 8 ja 10 millimeetrit. Katsekehad valati eelnevalt ettevalmistatud vormidesse AS TMB Element tootmishoones samas tehases valmistatud betooniklassiga C35/45. Katsekehasid valmistati kokku 35 tükki ning katsekehade betoonist kaitsekihid olid 15, 30 ja 40 millimeetrit. Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli maaehituse ja veemajanduse õppetooli laboris.

Magistritöös vaadeldi kolmemillimeetrisele läbipaindele vastavate koormuste võrdlusanalüüsi erinevate läbimõõtudega sarruste ja erinevate kaitsekihtidega. Tulemuseks saadi, et kõige tugevamad katsekehad olid sarrustega $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 10$, mis olid 15-millimeetrise kaitsekihiga. Keskmised koormuste tulemused olid vastavalt $78,75 \pm 9,25$ kN ja $76,75 \pm 13,82$ kN. Kõige madalama tulemuse andsid katsekehad sarrusega $2 \times \emptyset 6$ ja kaitsekihiga 30 millimeetrit, mille keskmise koormuse tulemus oli $47,50 \pm 5,60$ kN. Sarruse $2 \times \emptyset 8$ kõige parema tulemuse andsid katsekehad kaitsekihtidega 40 ja 30 millimeetrit. Nende keskmisteks koormuste tulemuseks olid vastavalt $69,00 \pm 9,01$ kN ja $69,75 \pm 3,36$ kN. Läbipaindeid vaadeldi veel lubatul läbipaindel, milleks antud proovikehadel oli 0,9 millimeetrit. Siin olid samuti tugevaimateks katsekehadeks sarrused $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 10$ 15-

millimeetrise kaitsekihiga ja koormuse tulemusega $46,0 \pm 6,71$ ja $45,75 \pm 5,97$ kN. Kõige madalama koormuse tulemusega olid katsekehad sarrusega $2 \times \emptyset 6$ 15- ja 30-millimeetrise kaitsekihtidega, mille keskmisteks koormuste tulemuseks tulid vastavalt $34,0 \pm 5,08$ ja $32,25 \pm 2,96$ kN. Sarruse $2 \times \emptyset 8$ 15-, 30- ja 40-millimeetrise kaitsekihtidega, mille keskmisteks koormuste tulemusteks tulid vastavalt $39,0 \pm 4,44$, $37,75 \pm 1,70$ ja $38,0 \pm 4,47$.

Järgnevalt toimus katsekehade koormamine kuni purunemiseni, mille koormuse tulemused jäid vahemikku 58,75–148,75 kN, sõltuvalt sarruse läbimõõdust ja kaitsekihi suurusest. Kõige kõrgemad keskmised tulemused $117,75 \pm 24,87$ ja $114,0 \pm 48,19$ kN andsid vastavalt $4 \times \emptyset 6$ 15-millimeetrise ja $2 \times \emptyset 8$ 30-millimeetrise kaitsekihiga. Vaatamata kõrgele keskmisele väärtusele olid sarrusega $2 \times \emptyset 8$ ja 30-millimeetrise kaitsekihiga katsekehade tulemused kõige ebaühtlasemad. Nende tulemuste erinevuseks tuli 55%, samal ajal kui $4 \times \emptyset 6$ katsekehadel oli selleks 37%. Kõige ühtlasema keskmise tulemuse andis $2 \times \emptyset 6$ 30-millimeetrise kaitsekihiga ja selle tulemuste erinevuseks oli 10%. Viimasena mainitud katsekehad olid ka kõige madalama keskmise koormusega, milleks oli $67,25 \pm 6,89$ kN.

Edasi leiti katsekehade paindetõmbetugevused purunemisel ja lubatud 0,9-millimeetrise läbipainde juures. Katse käigus teostati nelja punkti paindetõmbekatse, et selgitada eri sarruste ja eri kaitsekihiga betoontalade paindetõmbetugevused. Paindetõmbetugevuste keskmiste väärtuste erinevust kontrolliti t-testiga. Esialgu võeti võrdluse alla paindetõmbetugevused purunemisel sarnaste nakkepinnaga katsekehadel: $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 8$. Kaheksamillimeetrise sarruse 30- ja 40-millimeetrise kaitsekihtidega katsekehad olid võrreldes $4 \times \emptyset 6$ sarrusega sarnase keskmise väärtusega, kuid 15 millimeetrine kaitsekiht andis väärtuseks erineva keskmise tulemuse. Sellele tuginedes võib öelda, et $2 \times \emptyset 8$ 30- ja 40-millimeetrise kaitsekihtidega katsekehad on sama tugevad purunemisel kui $4 \times \emptyset 6$ 15-millimeetrise kaitsekihiga. Kuid vaadates tulemusi lubatud läbipainde korral on näha, et $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 8$ on kõikide kaitsekihtide puhul erineva keskmise väärtusega. Sellest saab järeldada, et $4 \times \emptyset 6$ kaitsekihiga 15 millimeetrit on nendevahelises võrdluses tugevam. Sarrustel $2 \times \emptyset 10$ ja $4 \times \emptyset 6$ 15-millimeetrise kaitsekihiga olid keskmised väärtused sarnased, vastavalt $5,94 \pm 0,74$ ja $5,98 \pm 0,83$ MPa. Lubatud läbipainde juures võib öelda, et kõige tugevamad katsekehad olid $4 \times \emptyset 6$ ja $2 \times \emptyset 10$. Kõige nõrgema tulemuse andsid $2 \times \emptyset 6$ kaitsekihtidega 15 ja 30 millimeetrit, mis olid vastavalt $4,40 \pm 0,63$ ja $4,24 \pm 0,38$ MPa.

Sarruste hindade võrdlemisel leiti, et arvestades kõrgeimat koormuse tulemust lubatud läbipainde saavutamiseks, siis kasutamiseks kõige sobilikum sarrus on $4 \times \emptyset 6$ kaitsekihiga 15

mm. Lisaks on sellele on antud sarruse purustatav koormus kõrgeim. Kuigi sarrust kulub teistest kaks korda rohkem, siis võib eeldada, et suurema koguse korral saab hinda maaletootajalt soodsamaks.

Töös teostatud katsete tulemusi saab kasutada alusmaterjalina klaasplastsarruse täiendavaks uurimiseks:

1. Katsed teostati erineva betoonist kaitsekihiga, mis annab võimaluse andmeid võrrelda tulepüsivuse katsel saadavate tulemustega.
2. Selleks, et leida täpsemaid andmeid läbipainde kohta, tuleks teostada veel täiendavaid katseid. Kasutada tuleks lisaks rohkematele katsekehadele ka erinevaid betooniklasse ja võimaluse korral suurendada nakketugevust betoonis.
3. Läbipainde vähendamiseks võib järgnevates katsetes kasutada rohkem ning suurema läbimõõduga vardaid ühe katsekeha kohta.

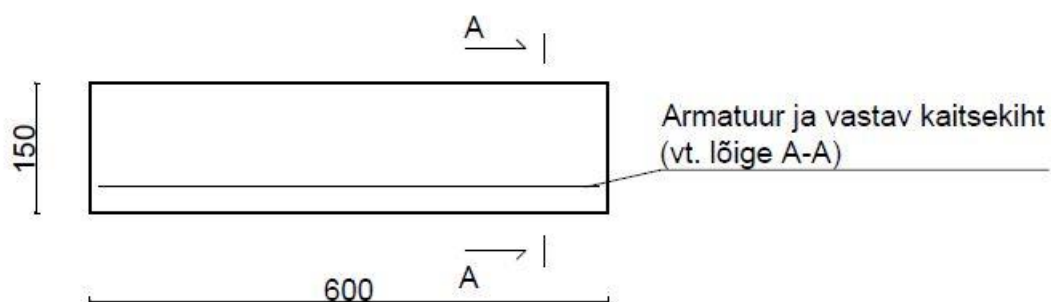
KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Joaquim A.O. Barros, Taheri M., Salehian H., Pedro J.D. Mendes.** (2012). A design model for fibre reinforced concrete beams pre-stressed with steel and FRP bars – Composite Structures, Vol 94, Issue 8, July 2012, lk 2494–2512.
2. **ACI Committee 440.** (2006). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, 44 lk.
3. **ACI Committee 440.** (2002). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 68 lk.
4. **Aramide F.O., Atanda P.O., Olorunniwo O.E.** (2012). Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite – International Journal of Composite Materials, 2(6). lk 147–151.
5. **Erden S., Sever K., Seki Y., Sarikanat M.** (2010). Enhancement of the mechanical properties of Glass/polyester Composites via Matrix Modifiatio Glass/polyester Composite Siloxane Matrix Modication – Fiber and Polymers 2010, Vol 11, No.5, lk 732–737.
6. **Sathishkumar TP., Naveen J., Satheeshkumar S.** (2014). Glass fiber – reinforced polymer composites – A review – Journal of Reinforced Plastics and Composites, April 2014, Vol 33(13), lk 1258–1275.
7. **Newhook J, Svecova D.** (2007). Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers: Design Manual No. 3. Canada: ISIS Canada Corporation, 151 lk.
8. **Alexander A. Safonov, Carlone P, Akhatov I.** (2018). Mathematical simulation of pultrusion processes: A review – Composite Structures, Vol 184, 2018, lk 153–177.
9. **Rosato DV, Rosato DV** (2004) Reinforced plastics handbook. Elsevier, viidatud: **Prashanth S, Subbaya KM, Nithin K, Sachhidananda S.** (2017). Fiber Reinforced Composites – A review – Journal of Material Science & Engineering, Vol 6, Issue 3, 6 lk.
10. **Hart-Smith LJ** (1987) Engineered Materials Handbook (Vol. 1). ASM International, Ohio lk 479–495, viidatud: **Prashanth S, Subbaya KM, Nithin K, Sachhidananda S.** (2017). Fiber Reinforced Composites – A review – Journal of Material Science & Engineering, Vol 6, Issue 3, 6 lk.
11. **Chris J. Burgotne, Byars E., Guadagnini M., Manfredi G., Neocleous K., Pilakoutas K., Taerwe L., Taranu N., Tepfers R., Weber A.** (2007). FRP reinforcement in RC structures – International Federation for Structural Concrete, 151 lk.

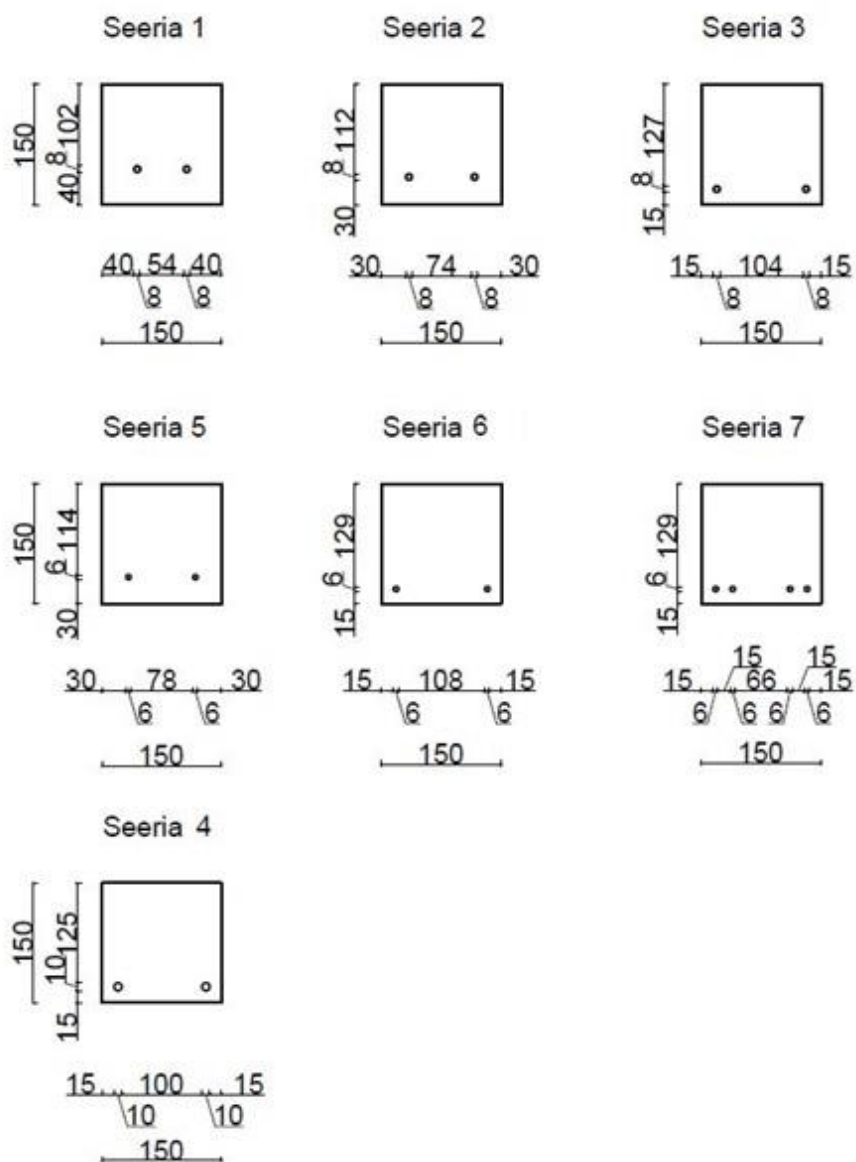
12. **OÜ donleon klaasplastarmatuur.** <http://donleon.ee/klaasplastarmatuur/> (02.05.2018)
13. **Armastek klaasplastarmatuur.** <https://armastek.ru/en/composite-reinforcement/glassfiber-reinforcement/> (02.05.2018)
14. **Tallinna Tehnikaülikooli sertifitseerimisasustus.** (2013). Hinnang klaasplastsarruse füüsikalise-mehaaniliste omaduste katsetulemuste kohta. Tallinn.
15. **Goldston M.W., Remennikov A., Neaz Sheikh M.** (2017). Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultra high strength concrete beams. – Construction and Building Materials, Vol 131, lk 606–617.
16. **Zobel H.,** (2004). Composites Bridges, 50. Jubileuszowa Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica viidatud: **Sonnenschein R., Gajdosova K., Holly I.** (2016). FRP Composite and Their Usin in the Construction of Bridges – Procedia Engineering, Vol 161, 2016, lk 477–482.
17. **Magnethõljukraudtee foto.** <https://edition.cnn.com/2015/04/21/asia/japan-maglev-train-world-record/index.html> (02.05.2018)
18. **Kivistunud betooni katsetamine, Osa 1:** Kuju, mõõtmised ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded. (2012). EVS-EN 12390-1:2012. Tallinn: Standardiamet.
19. **Kivistunud betooni katsetamine, Osa 2:** Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine. (2009). EVS-EN 12390-2:2009. Tallinn: Standardiamet.
20. **Kivistunud betooni katsetamine, Osa 5:** Katsekehade paindetõmbetugevus. (2009). EVS-EN 12390-5:2009. Tallinn: Standardiamet.
21. **Masso, T. jt.** (2014). Ehituskonstruktori käsiraamat, Tallinn: Autorid ja Ehitame kirjastus, 577lk.
22. **Klaasplastsarruse edasimüüja Puumarket.**
<https://puumarket.ee/en/tootekategooria/uldehitus/armatuur/klaasplastarmatuur/>
(11.05.2018)

LISAD

Lisa 1. Klaasplastsarrusega tugevdatud betoonist katsekehad



Lõige A-A



Lisa 2. Katsekehade valmistamine



a) Katsekehade rakis koos sarrusega



b) Valmis katsekehade eemaldamine

Lisa 3. C35/45 betooni andmed

Valu kuupäev	Bet.segu kood	Betooni klass	Tihedus kg/m³	28p tugevus MPa
22.11.2017	1454	C35/45	2403	66,8
29.11.2017	1454	C35/45	2366	62,5
13.12.2017	1454	C35/45	2421	65,7
18.12.2017	1454	C35/45	2401	68,2

Lisa 4. Katsekehade läbipainded vastavalt koormusele

Katsekeha nimetus	Koormusele (kN) saadud vastav läbipaine (mm)							Koormused 3 mm korral kN
	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	
Seeria 1. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 40 mm								
1-1	0,12	0,50	1,33	2,32	3,90			63,75 (4 mm)
1-2	0,12	0,19	0,68	1,60	2,22	3,53		81,25 (4 mm)
1-3	0,09	0,21	0,76	1,76	3,39			70,0 (4 mm)
1-4	0,10	0,20	0,92	2,31	3,63			65,0 (4 mm)
1-5	0,09	0,19	0,83	2,60	3,40			65,0 (4 mm)
Keskmine	0,10	0,26	0,90	2,12	3,31	3,53		69,0 (4 mm)±9,01
Seeria 2. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 30 mm								
2-1	0,11	0,21	0,67	1,24	2,07			72,5 (4 mm)
2-2	0,10	0,20	0,74	1,63	2,36			66,25 (4 mm)
2-3	0,10	0,17	0,64	1,47	2,28			72,50
2-4	0,12	0,19	0,98	1,75	2,57			68,75
2-5	0,14	0,22	0,90	1,55	2,53			68,75
Keskmine	0,11	0,20	0,79	1,53	2,36			69,75±3,36
Seeria 3. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 15 mm								
3-1	0,12	0,20	1,23	2,41				56,25
3-2	0,10	0,19	0,67	1,51	2,39			68,75
3-3	0,12	0,18	0,99	1,83	2,83			63,75
3-4	0,13	0,23	0,56	1,22	2,01	3,00		75,0
3-5	0,10	0,18	0,87	1,63	2,68			66,25
Keskmine	0,11	0,20	0,86	1,72	2,48	3,00		66,0±8,53
Seeria 4. Sarrus 2×ø10, kaitsekiht 15 mm								
4-1	0,12	0,20	0,47	0,75	1,80	2,30	2,78	93,75
4-2	0,12	0,18	0,65	1,14	1,78	2,38		76,25
4-3	0,11	0,19	0,61	1,10	1,58	3,00		75,0
4-4	0,11	0,16	0,45	1,06	1,60	2,94		76,25
4-5	0,14	0,19	0,75	1,23	1,78			62,50
Keskmine	0,12	0,18	0,59	1,06	1,71	2,66	2,78	76,5±13,82
Seeria 5. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 30 mm								
5-1	0,12	0,19	2,06					43,75
5-2	0,13	0,21	2,28					42,5
5-3	0,1	0,17	1,22					48,75
5-4	0,11	0,18	0,90					48,75
5-5	0,12	0,18	1,59	2,62				53,75
Keskmine	0,12	0,19	1,61	2,62				47,5±5,60
Seeria 6. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 15 mm								
6-1	0,1	0,17	1,15					46,25
6-2	0,12	0,21	2,02					43,75
6-3	0,09	0,15	0,80	2,59				53,75
6-4	0,04	0,13	1,25	3,00				50,0
6-5	0,1	0,16	0,79	2,85				51,25
Keskmine	0,09	0,16	1,20	2,81				49,0±4,96
Seeria 7. Sarrus 4×ø6, kaitsekiht 15 mm								
7-1	0,12	0,19	0,46	0,90	1,77	2,25		86,25
7-2	0,10	0,17	0,23	0,76	1,39	2,32	3,00	87,5
7-3	0,09	0,15	0,46	1,38	2,30			73,75
7-4	0,11	0,20	0,49	1,08	1,58			73,75
7-5	0,10	0,17	0,71	1,53	2,25			72,5
keskmine	0,10	0,18	0,47	1,13	1,86	2,29	3,00	78,75±9,25

Lisa 5. Katseprotokollid

Seeria 1. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 40 mm															
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised				Keskmised mõõdud				Tugirullide vahe l, mm	Purustav koormus kN	Katsekehade paindetõmbetugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	pikkus, L	x - telg	y - telg	mm	pikkus, L			
1	1-1	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	150	600							76,3	10,05
					149	152	600		149,7	151,0		600,0	450		
					150	151	600								
2	1-2	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	151	151	600							106,3	13,83
					151	152	599		151,0	151,3		599,3	450		
					151	151	599								
3	1-3	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	600							88,8	11,60
					150	152	600		150,3	151,3		600,0	450		
					151	151	600								
4	1-4	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	151	151	600							140,0	18,10
					150	153	599		150,7	152,0		599,3	450		
					151	152	599								
5	1-5	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	601							113,8	14,90
					152	151	601		150,7	151,0		601,0	450		
					150	151	601								

a) Seeria 1 katseprotokoll

Lisa 5 järg.

Seeria 2. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 30 mm													
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised			Keskmised mõõdud			Tugirullide vahe l, mm	Purustav koormus kN	Katsekehade paiderõmbetugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	pikkus, L	x - telg	y - telg			
1	2-1	09.01.2018	21.03.2018	3ИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	150	601	150,0	150,7	601,0	450	78,8	10,41
					150	151	601						
					150	151	601						
2	2-2	09.01.2018	21.03.2018	3ИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	151	600	150,7	152,0	600,0	450	66,3	8,56
					151	153	600						
					151	152	600						
3	2-3	09.01.2018	21.03.2018	3ИМ П-125 Kahes punktis koormamine	151	152	600	152,0	153,0	599,7	450	146,3	18,50
					152	154	599						
					153	153	600						
4	2-4	09.01.2018	21.03.2018	3ИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	150	600	150,3	151,0	600,3	450	148,8	19,53
					151	152	601						
					150	151	600						
5	2-5	09.01.2018	21.03.2018	3ИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	151	601	150,3	151,3	600,7	450	130,0	16,99
					151	152	600						
					150	151	601						

b) Seeria 2 katseprotokoll

Lisa 5 järg.

Seeria 3. Sarrus 2xø8, kaitsekiht 15 mm													
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised			Keskmesid mõõdud			Tugirullide vahe l, mm	Purustav koormus kN	Katsekehade paindetõmbetugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	x - telg	y - telg	mm			
1	3-1	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	600	150,3	153,0	599,7	450	101,3	12,9
					151	153	599						
					150	154	600						
2	3-2	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	601	150,0	152,3	600,3	450	76,3	9,9
					150	153	600						
					150	153	600						
3	3-3	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	153	600	150,7	152,0	600,0	450	75,0	9,7
					151	152	600						
					151	151	600						
4	3-4	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	153	599	150,3	153,3	599,7	450	98,8	12,6
					150	154	600						
					151	153	600						
5	3-5	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	600	150,7	152,3	600,3	450	76,3	9,8
					151	153	601						
					151	153	600						

c) Seeria 3 katseprotokoll

Seeria 4. Sarrus 2xø10, kaitsekiht 15 mm													
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised			Keskmised mõõdud			Tugirullide vahe l, mm	Purustav koormus kN	Katsekehade painedõmbeugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	x - telg	y - telg	mm			
1	4-1	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	599	150,0	152,3	599,7	450	107,5	13,9
					150	153	600						
					150	152	600						
2	4-2	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	600	150,0	152,3	600,7	450	90,0	11,6
					150	153	601						
					150	152	601						
3	4-3	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	600	150,3	152,3	600,3	450	82,5	10,6
					150	153	601						
					151	152	600						
4	4-4	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	150	600	150,0	150,7	600,3	450	91,3	12,1
					150	152	601						
					150	150	600						
5	4-5	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	151	152	601	150,7	151,7	600,3	450	62,5	8,1
					151	151	600						
					150	152	600						

d) Seeria 4 katseprotokoll

Lisa 5 järg.

Seeria 5. Sarrus 2xø6, kaitsekiht 30 mm													
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised			Keskmised mõõdud			Tugirullide vahe l, mm	Purustav koormus kN	Katsekehade painedõmbeugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	x - telg	y - telg	mm			
1	5-1	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	600	150,3	151,3	600,0	450	73,8	9,6
					151	152	600						
					150	150	600						
2	5-2	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	600	150,3	151,7	600,0	450	66,3	8,6
					151	153	600						
					150	151	600						
3	5-3	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	601	150,3	151,0	600,3	450	70,0	9,2
					150	152	600						
					151	150	600						
4	5-4	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	600	150,0	151,7	600,0	450	58,8	7,7
					150	152	601						
					150	151	599						
5	5-5	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	153	600	150,3	152,3	600,0	450	67,5	8,7
					151	153	600						
					150	151	600						

e) Seeria 5 katseprotokoll

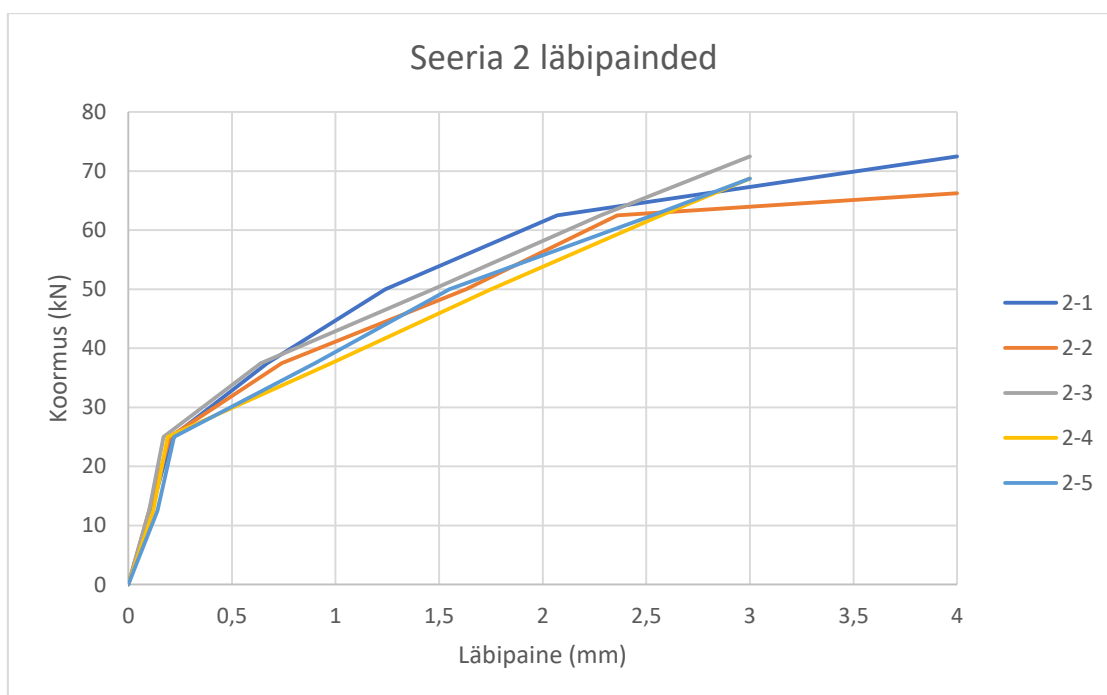
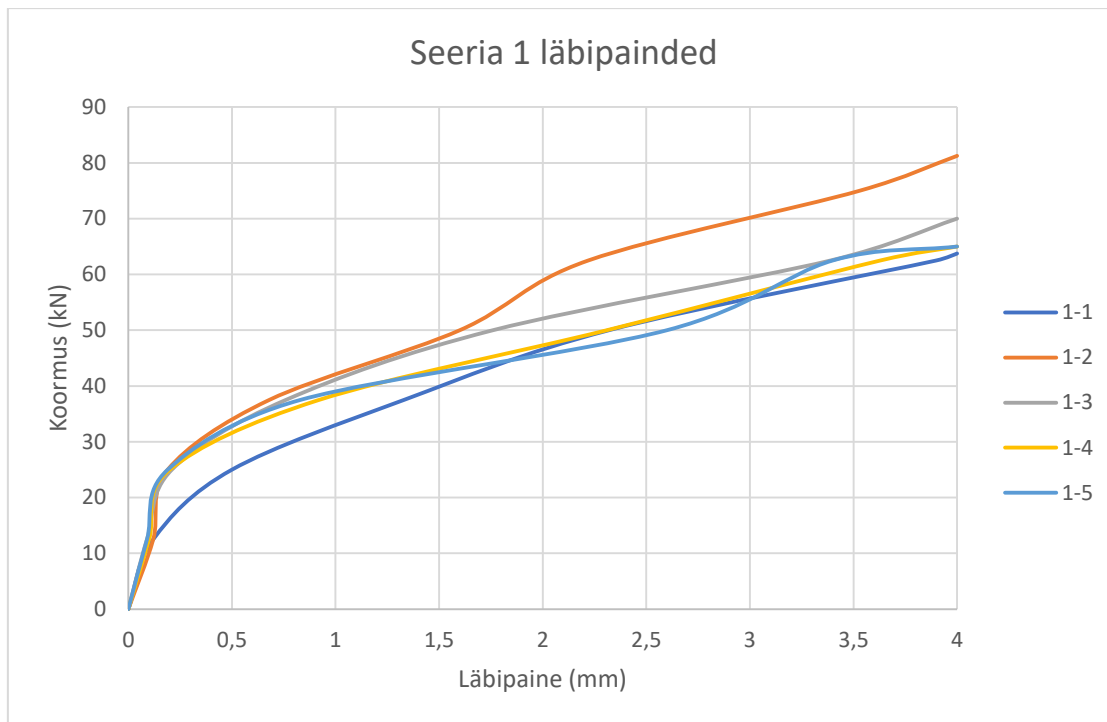
Seeria 6. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 15 mm														
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised			Keskmesid mõõdud			Tugirullide vahe		Purustav koormus kN	Katsekehade painedõmbetugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	x - telg	y - telg	mm	x - telg	l, mm		
1	6-1	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahes punktis koormamine	151	151	600						83,8	10,8
					151	153	599	151,0	152,0	599,7	450			
					151	152	600							
2	6-2	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	153	600						65,0	8,4
					150	152	600	150,0	152,7	600,0	450			
					150	153	600							
3	6-3	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	153	600						72,5	9,4
					149	153	600	149,7	152,7	600,0	450			
					150	152	600							
4	6-4	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahes punktis koormamine	150	153	600						71,9	9,3
					150	153	600	150,0	152,7	600,0	450			
					150	152	600							
5	6-5	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahes punktis koormamine	151	152	601						65,0	8,4
					151	152	600	150,7	152,3	600,0	450			
					150	153	599							

f) Seeria 6 katseprotokoll

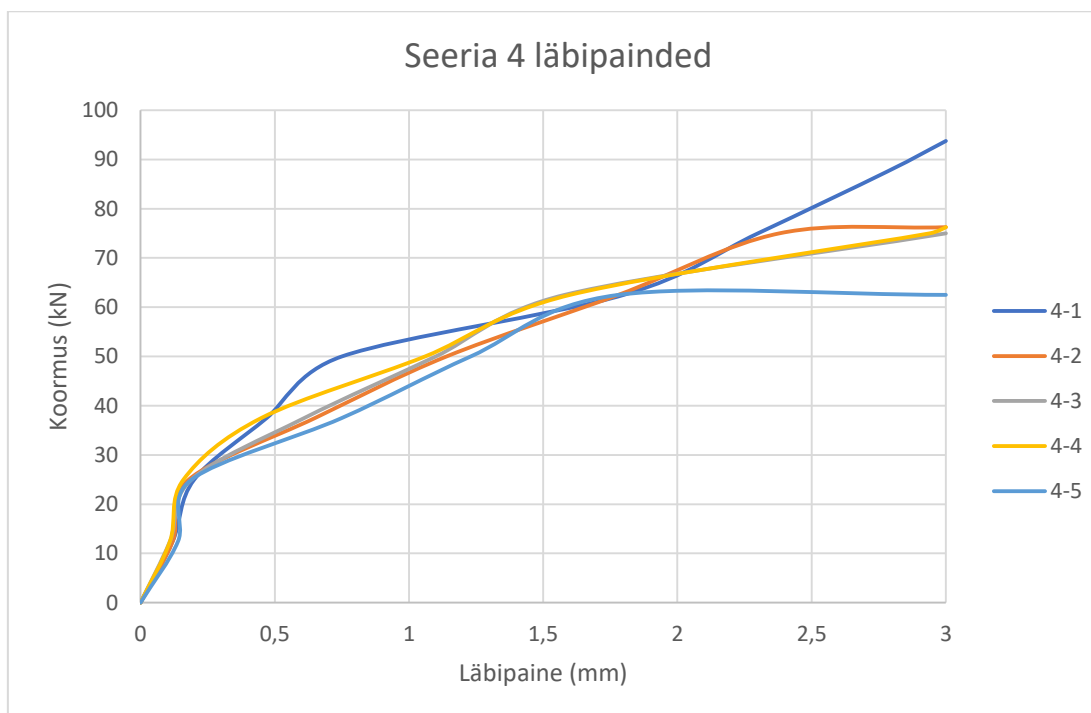
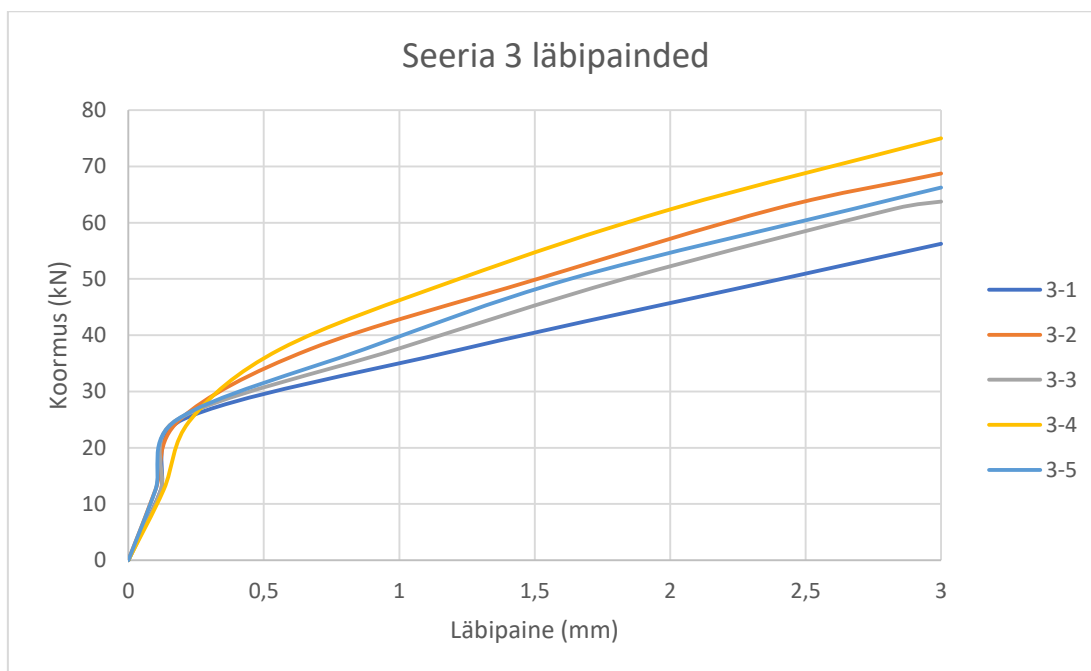
Seeria 7. Sarrus 4x6, kaitsekiht 15 mm													
Jrk. nr.	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Seadme tüüp	Katsekeha mõõtmised			Keskmised mõõdud			Tugirullide vahe l, mm	Purustav koormus kN	Katsekehade paistetõmbetugevus MPa
					x - telg	y - telg	mm	x - telg	y - telg	mm			
1	7-1	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	151	151	601	150,3	152,3	600,3	450	138,8	17,9
					150	153	600						
					150	153	600						
2	7-2	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	152	600	150,0	151,7	600,3	450	127,5	16,6
					150	151	601						
					150	152	601						
3	7-3	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	151	152	600	150,3	151,3	600,7	450	126,3	16,5
					150	150	601						
					150	151	601						
4	7-4	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	151	601	150,0	151,3	600,3	450	87,5	11,5
					150	152	599						
					150	151	601						
5	7-5	09.01.2018	21.03.2018	ЗИМ П-125 Kahe punktis koormamine	150	150	601	150,7	151,3	600,7	450	108,8	14,2
					151	152	600						
					151	152	601						

g) Seeria 7 katseprotokoll

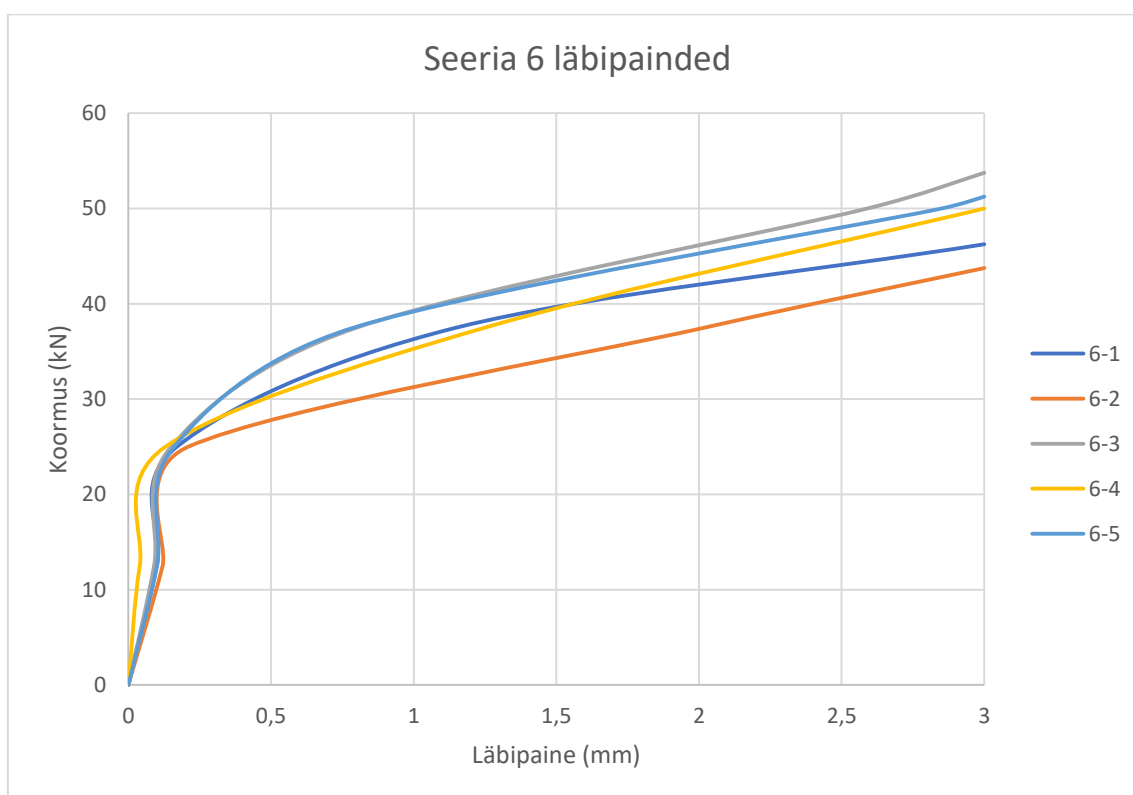
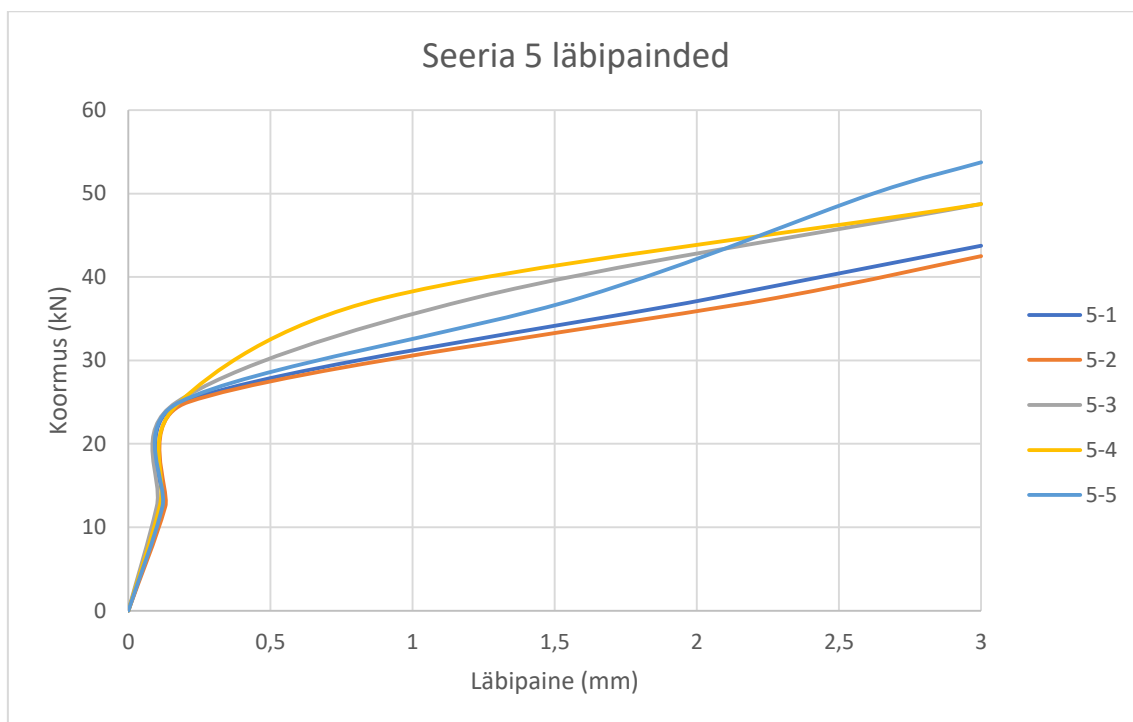
Lisa 6. Katsekehade paindediagrammid



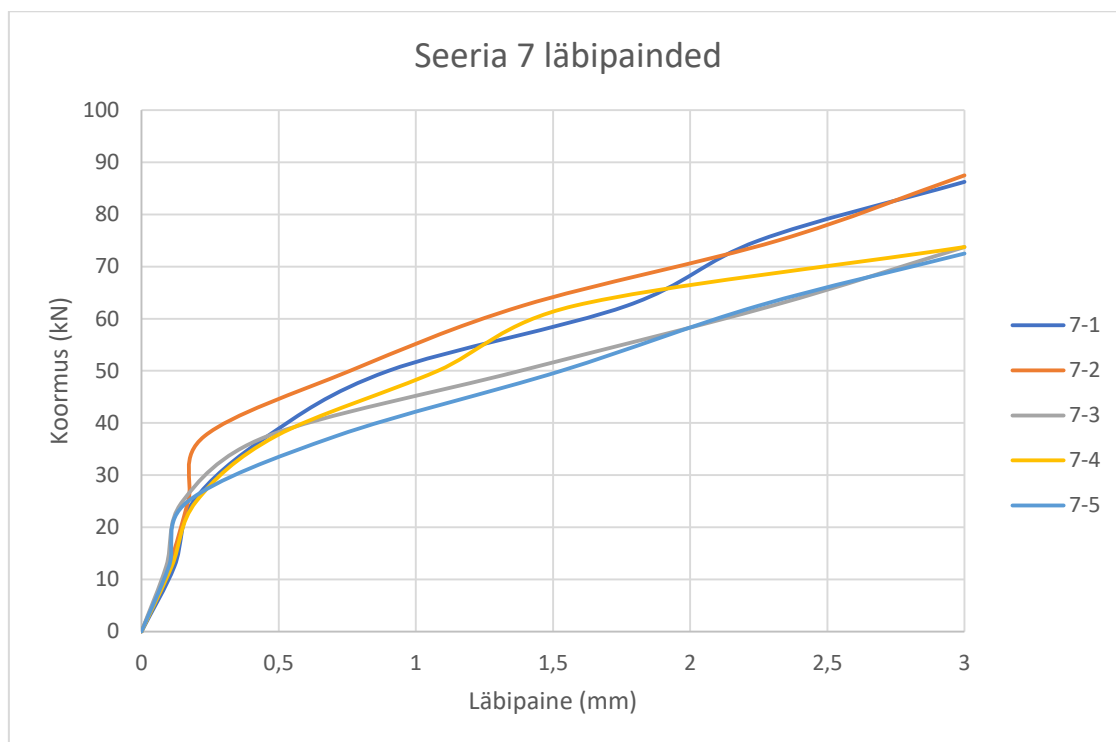
Lisa 6 järg.



Lisa 6 järg.



Lisa 6 järg.



Lisa 7. Koormused lubatud läbipaindel

Katsekeha nimetus	Koormus kN		Paindetõmbetugevus MPa	
		Keskmine		Keskmine
Seeria 1. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 40 mm				
1-1	32,5	38,0±4,47	4,3	4,90±0,70
1-2	41,25		5,4	
1-3	40,0		5,2	
1-4	36,25		4,7	
1-5	40,0		5,2	
Seeria 2. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 30 mm				
2-1	40,0	37,75±1,70	5,3	4,90±0,29
2-2	37,5		4,8	
2-3	37,5		4,7	
2-4	36,25		4,8	
2-5	37,5		4,9	
Seeria 3. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 15 mm				
3-1	35,0	39,0±4,44	4,5	5,04±0,59
3-2	43,75		5,7	
3-3	36,25		4,7	
3-4	41,25		5,3	
3-5	38,75		5,0	
Seeria 4. Sarrus 2×ø10, kaitsekiht 15 mm				
4-1	53,75	45,75±5,97	6,9	5,94±0,74
4-2	43,75		5,7	
4-3	43,75		5,6	
4-4	46,25		6,1	
4-5	41,25		5,4	
Seeria 5. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 30 mm				
5-1	28,75	32,25±2,96	3,8	4,24±0,38
5-2	31,25		4,1	
5-3	32,5		4,6	
5-4	35,0		4,6	
5-5	33,75		4,4	
Seeria 6. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 15 mm				
6-1	33,75	34,0±5,08	4,4	4,40±0,63
6-2	30,0		3,9	
6-3	37,5		4,8	
6-4	30,0		3,9	
6-5	38,75		5,0	
Seeria 7. Sarrus 4×ø6, kaitsekiht 15 mm				
7-1	50,0	46,0±6,71	6,4	5,98±0,83
7-2	52,5		6,8	
7-3	41,25		5,4	
7-4	46,25		6,1	
7-5	40,0		5,2	

Lisa 8. Purustav koormus ja paindetõmbetugevus

Katsekeha nimetus	Koormus kN		Paindetõmbetugevus MPa	
		Keskmine		Keskmine
Seeria 1. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 40 mm				
1-1	76,25	105,0±30,25	10,1	13,70±3,84
1-2	106,25		13,8	
1-3	88,75		11,6	
1-4	140,0		18,1	
1-5	113,75		14,9	
Seeria 2. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 30 mm				
2-1	78,75	114,0±48,19	10,4	14,80±6,16
2-2	66,25		8,6	
2-3	146,25		18,5	
2-4	148,75		19,5	
2-5	130,0		17,0	
Seeria 3. Sarrus 2×ø8, kaitsekiht 15 mm				
3-1	101,25	85,50±16,48	12,9	10,98±2,01
3-2	76,25		9,9	
3-3	75,0		9,7	
3-4	98,75		12,6	
3-5	76,25		9,8	
Seeria 4. Sarrus 2×ø10, kaitsekiht 15 mm				
4-1	107,5	86,75±20,28	13,9	11,26±2,65
4-2	90,0		11,6	
4-3	82,5		10,6	
4-4	91,25		12,1	
4-5	62,5		8,1	
Seeria 5. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 30 mm				
5-1	73,75	67,25±6,89	9,6	8,76±0,89
5-2	66,25		8,6	
5-3	70,0		9,2	
5-4	58,75		7,7	
5-5	67,5		8,7	
Seeria 6. Sarrus 2×ø6, kaitsekiht 15 mm				
6-1	83,75	71,75±9,54	10,8	9,26±1,22
6-2	65,5		8,4	
6-3	72,5		9,4	
6-4	72,5		9,3	
6-5	65,0		8,4	
Seeria 3. Sarrus 4×ø6, kaitsekiht 15 mm				
7-1	138,75	117,75±24,87	17,9	15,34±3,14
7-2	127,5		16,6	
7-3	126,25		16,5	
7-4	87,5		11,5	
7-5	108,75		14,2	

Lisa 9. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Henry Maask,
Sünniaeg 08.11.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Klaasplastsarrusega betoontalade läbipainde uurimine

mille juhendaja(d) on Alexander Ryabchikov

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
- kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____ 23.05.2018
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Alexander Ryabchikov
(juhendaja nimi ja allkiri)

23.05.2018
(kuupäev)